

Joonas Jaakkola

# Lämpörankaprofiilin mitoitus seinärakenteessa

Metropolia Ammattikorkeakoulu

Insinööri (AMK)

Rakennustekniikka

Insinöörityö

7.3.2018

Tekijä Otsikko	Joonas Jaakkola Lämpörankaprofiilin mitoitus seinärakenteessa
Sivumäärä Aika	53 sivua + 2 liitettä 7.3.2018
Tutkinto	Insinööri (AMK)
Tutkinto-ohjelma	Rakennustekniikka
Ammatillinen pääaine	Rakennetekniikka
Ohjaajat	Suunnittelija Kalle Sinisalo Projektinjohtaja Markku Laine Laboratorioinsinööri Matti Leppä
<p>Tässä insinöörityössä tutkittiin kylmämuovaamalla valmistettua teräsohutlevyrankaa, jonka uuma on rei'itetty. Rei'ityksen tarkoituksena on vähentää lämmönjohtumista profiilin lävitse. Tutkimuksen profiili toimi eriste-elementtiseinäjärjestelmässä vaakasuuntaisena sekundaarikannattimena, joka vastaanottaa ja siirtää kuormaa pystysuuntaisille primaarikannattimille. Rangat mitoitettiin huomioiden ainoastaan vaakakuorma, joka on tuulikuorma. Tuulikuorma aiheutti normaali tilanteessa toiseen laippaan puristusta ja toiseen vetoa, kyseessä oli siis taivutettu rakenne.</p> <p>Tutkimus keskittyi soveltamaan Eurokoodia 3 mitoitukseen. Lisäksi merkittävässä osassa oli uuman rei'ityksen huomioiminen laskennassa siihen erikoistuneella mitoitusmenetelmällä. Laskennallisen tutkimuksen lisäksi insinöörityöhön sisältyy kirjallinen osuus sekä FEM-laskenta osuus, jonka tarkoituksena on varmentaa käsinlaskennan tuloksia. Insinöörityön päättymisen jälkeen rakenteelle tehdään kolmannen osapuolen toimesta asianmukaiset kuormituskokeet.</p> <p>Tutkimuksessa laskettiin teholliset poikkileikkaussuureet ja mitoitettiin profiili kolmella eri ainepaksuudella. Kuormitustilanteita varioitiin useissa eri tapauksissa. Käytännössä tämä tarkoittaa, että tuulikuorman laskennassa käytettiin useita eri rakennuksen sijoituspaikkoja sekä dimensioita. Lisäksi tarkasteltiin maksimijännevälejä, jotka profiileilla voitiin toteuttaa. Insinöörityössä toteutettiin yli 60 toisistaan eroavaa laskelmaa. Profiilin poikkileikkauksen muoto oli määritelty tutkimuksen alkaessa aiempien tutkimusten ja tuotekehityksen perusteella.</p> <p>Insinöörityössä verrattiin saatuja käsinlaskennan tuloksia FEM-laskennan tuloksiin ja todettiin laskennan korreloivan hyvin FEM-laskentaa. Tämän perusteella voitiin todeta mitoituksen onnistuneen hyvin, lisäksi myös työlle asetetut tavoitteet katsottiin saavutetuksi.</p> <p>Tuloksena saatiin seinäjärjestelmään ja tuotantoon soveltuva vaakasuuntaisesti asennettava lämpörankaprofiili, lukuisia laskupohjia ja kirjallinen raportti. Tutkimuksen lämpörankaprofiili soveltuu mekaanisentarkastelun perusteella käytettäväksi työssä esitellyillä reunaehdoilla.</p>	
Avainsanat	Lämpörankaprofiili, termorei'itys, uumarei'itetty teräsranka, seinäjärjestelmä, SFS-EN 1993 1-3, Salhab ja Wang

Author Title	Joonas Jaakkola Design of thermo profile in wall structure
Number of Pages Date	53 pages + 2 appendices 7 March 2018
Degree	Bachelor of Engineering
Degree Programme	Civil Engineer
Professional Major	Structural Engineering
Instructors	Kalle Sinisalo, Designer Markku Laine, Project Director Matti Leppä, Laboratory Engineer
<p>The study deals with cold formed steel studs, which are perforated from their web. Perforating is created to reduce heat conduction through the web. These studs are called thermo profiles.</p> <p>In this study, the object was to develop a thermo profile to the outer wall structure. The wall structure is a product of Finnfoam Oy and it is called FF-Wall. FF-Wall is built from insulation elements supported by horizontally installed thermo profiles, which are attached to vertical load bearing structures. The study only examined the thermo profiles that are installed horizontally in the structure. The only load straining the thermo profile is variable load by its nature and it is caused by the wind.</p> <p>The thesis consists of three main parts; the written part, manual calculations and FEM calculations. The main focus of the study was in the manual calculation part. From the very beginning the profile measures were determined. The reason for this was earlier research and the productive causes.</p> <p>The manual calculation part consists of three sections as well. First the effective cross-section values were calculated, then the designing was executed. After these phases the maximal spans of the profiles were examined.</p> <p>The calculations were executed according to Eurocode, however the perforation of the web had to be considered as a reducing factor of the carrying capacity of the profile. Eurocode does not have a confirmed method specifically considering thermo profiles and therefore does not define any factor that would consider the perforation. This is why the thickness of the web was reduced by calculating the reduction factor using a theory created by Salhab and Wang (2008) before exercising the norms of Eurocode.</p> <p>As a result of the study a Z60-thermo profile were designed and manual calculations were made with multiple different load conditions. The calculated values were compared to FEM calculation results and conclusions were drawn. The calculations were reliable. The calculated values corresponded with great accuracy to the FEM calculated values.</p>	
Keywords	Perforated web, slotted steel stud, wall system, SFS-EN 1993 1-3, Salhab & Wang

## Alkusanat

*Tämä insinöörityö toteutettiin Ramboll Finland Oy:lle Finnfoam Oy:n toimeksiannosta. Kiitos molemmille tahoille mahdollisuudesta päästä tekemään opinnäytetyö mielenkiintoisesta aiheesta. Opinnäytetyön aiheen mielenkiintoa on lisännyt koko projektin ajan myös tieto siitä, että kehityskohteena on oikea tuote, jonka päämääränä on päätyä markkinoille. Kiitos myös työn rahoittamisesta.*

*Työn alkuvaiheessa ja lähtökohtien selvitessä, aihe tuntui jopa kunnianhimoiselta insinöörityön aiheeksi. Vaativan aiheen tuomat haasteet olivat kuitenkin hyvin hallittavissa erinomaisen työnohjauksen sekä innostavan suhtautumisen ansiosta. Näihin edellä mainittuihin syytöksiin syyllistyi etenkin työn ohjaajat Kalle Sinisalo ja Markku Laine. Suuri kiitos teille.*

*Haluan kiittää myös työn tilaajan edustajaa Jouni Erosta opastavasta ja asiantuntevasta otteesta sekä jouhevasta yhteistyöstä koko insinöörityön ajalta. Kiitän ammattikorkeakoulun valvojaopettajaa työnteon aikana käydyistä ohjauskeskusteluista, asiantuntevista kommentteista sekä insinöörityöni tarkastamisesta. Hyvässä yhteistyössä toimineiden työtä ohjanneiden ja valvoneiden henkilöiden lisäksi, haluan kiittää kollegaani ja opiskelukaveriani Riku Niirasta työni kommentoinnista ja kehitysideoista koko työni ajalta.*

*Insinöörityön teko on ollut mielenkiintoinen, monipuolinen ja opettavainen prosessi. Tästä on hyvä jatkaa rakentamisen parissa kohti uusia haasteita.*

Helsingissä 7.3.2018



Joonas Jaakkola

# Sisällys

Merkinnät

Lyhenteet

1	Johdanto	1
1.1	Tausta	2
1.2	Tutkimuksen tavoitteet ja rajaus	2
1.3	Tutkimusmenetelmät	3
1.4	Tutkimuksen toimeksianto	3
1.4.1	Ramboll Finland Oy	4
1.4.2	Finnfoam Oy	4
2	Tutkimuksen lähtökohdat ja taustatiedot	5
2.1	FF-Wall-seinäjärjestelmä	6
2.1.1	Seinäjärjestelmän rakenne	6
2.1.2	Seinäjärjestelmän edut	7
2.2	Lämmöneristeet tarkasteltavassa rakenteessa	8
2.2.1	EPS-lämmöneriste	8
2.2.2	PIR-lämmöneriste	9
2.2.3	XPS-lämmöneriste	9
3	Kylmämuovattu uumarei'itetty teräsohutlevyranka	11
3.1	Teräs materiaalina	12
3.2	Ohutlevyrankaprofiileiden valmistus	13
3.2.1	Rullamuovaus	13
3.2.2	Särmäys	14
3.3	Ohutlevyrankaprofiileiden termorei'ityksen toteuttaminen	15
3.4	Termorei'ityksen vaikutus poikkileikkauksen kapasiteettiin	16
3.5	Termorei'ityksen vaikutus lämmönjohtavuuteen	16
4	Yksittäisten termorankojen välisen liitoksen toteuttaminen	17
4.1	Liitoksen toteuttaminen	18
4.2	Ohutlevyliitoksen suunnittelussa huomioitavat murtumistavat	18
5	Laskennallisen tutkimuksen teoria	19
5.1	Poikkileikkaussuureiden laskenta	20
5.1.1	Jäykistetyt ja jäykistämättömät levyosat	22

5.1.2	Salhab ja Wang, mitoitusmenetelmä uumareitetylle profiilille	23
5.1.3	Reunakäänteellisen Z-profiilin ekvivalentin systeemin kiertymäjousen määrittäminen	26
5.2	Tuulikuorman laskenta	29
5.2.1	Tuulen voimakertoimen määrittäminen	32
5.2.2	Kokonaistuulivoiman määrittäminen	33
5.3	Mitoitus	34
5.3.1	Voimasuureet ja kuormayhdistelmät	35
5.3.2	Taivutuskestävyyden laskenta	35
5.3.3	Leikkauslommahduskestävyyden laskenta	36
5.3.4	Taipuman tarkistaminen	36
5.4	Jännevälin tarkastelu	37
6	Laskennan tulokset	38
6.1	Teholliset poikkileikkausarvot	38
6.2	Mitoituksen tulokset	39
6.3	Jännevälin tarkastelun tulokset	42
7	FEM-laskentaosuus	44
7.1	FEM-laskennan rakennemalli	44
7.2	Menetelmät FEM-laskennan tulosten käsittelyyn	45
7.3	FEM-laskennan tulokset ja niiden vertaaminen käsinlaskentaan	47
8	Yhteenveto	48
	Lähteet	51
	Liitteet	
	Liite 1. Poikkileikkaussuureiden laskenta Z60 t2 -lämpörankaprofiilille	
	Liite 2. Mitoitus Z60 t2 -lämpörankaprofiilille	

## Merkinnät

### Latinalaiset isot kirjaimet

$A_s$	$[\text{mm}^2]$	laipan jäykisteen tehollinen pinta-ala
$A_{\text{eff.tot}}$	$[\text{mm}^2]$	poikkileikkauksen tehollinen poikkipinta-ala
$C_\theta$	$[\text{N/rad}]$	kiertymistä kuvaavan jousen jäykkyys
$E$	$[\text{N/mm}^2]$	materiaalin kimmokerroin
$F$	$[\text{N}]$	voima
$I_{\text{yeff}}$	$[\text{mm}^4]$	tehollinen jäyhyysmomentti
$K$	$[\text{N/mm}^2]$	siirtymistä kuvaava jousen jäykkyyskerroin
$K_{\text{FI}}$		kuormakerroin
$M_{\text{y,Rd}}$	$[\text{Nm}]$	tehollisen poikkileikkauksen taivutuskapasiteetti
$W_{\text{y,eff}}$	$[\text{mm}^3]$	tehollinen taivutusvastus
$Y$		kerroin uuman paksuuden redusointikertoimen määrittämiseksi

## Latinalaiset pienet kirjaimet

$a$	[mm]	puristetun laipan leveys
$a_1$	[mm]	puristetun laipan reunakäänteen leveys
$b$	[mm]	vedetyn laipan leveys
$b_1$	[mm]	vedetyn laipan reunakäänteen leveys
$c_1$		kerroin uuman paksuuden reduktiokertoimen määrittämiseksi
$c_2$		kerroin uuman paksuuden reduktiokertoimen määrittämiseksi
$c_{eff}$	[mm]	laipan reunajäykisteen tehollinen leveys
$d$	[mm]	termorei'ityksen yhden reiän pituus
$f_u$	[N/mm <sup>2</sup> ]	teräksen murtolujuus
$f_{yb}$	[N/mm <sup>2</sup> ]	teräksen myötöraja
$h_w$	[mm]	uuman korkeus
$k_\sigma$		lommahduskerroin
$k_{red}$		uuman paksuuden reduktiokerroin
$k_{red,Kesti}$		Kestin (2000) uuman paksuuden reduktiokerroin
$l_s$	[mm]	termorei'ityksen reikien yhteenlaskettu kokonaiskorkeus
$n$		termorei'ityksen reikärivien lukumäärä uuman korkeudella
$p$	[mm]	termorei'ityksen yhden reiän korkeus
$p_b$	[mm]	termorei'ityksen reikien yhteenlaskettu kokonaiskorkeus



$t$	[mm]	teräsytimen paksuuden mitoitusarvo ennen kylmämuovausta, joka ei sisällä metallisen tai orgaanisen pinnoitteen paksuutta
$t_w$	[mm]	uuman paksuus
$u$	[N/m]	yksikkökuorma
$w_s$	[mm]	termorei'ityksen reikien välisen ehjän kaistaleen leveys rangan leveyssuunnassa
$w_p$	[mm]	termorei'ityksen rei'itetyn alueen kokonaisleveys

#### Kreikkalaiset pienet kirjaimet

$\gamma_M$		poikkileikkauskestävyyden osavarmuusluku poikkileikkausluokasta riippumatta
$\delta$	[mm]	Jäykisteen siirtymä yksikkökuormasta
$\varepsilon$		jäykisteen siirtymä yksikkökuormasta $f_{yb}$ riippuva tekijä
$\lambda$		taso-osan hoikkuus
$\nu$		Poissonin luku
$\sigma_{cr,s}$	[N/mm <sup>2</sup> ]	kimmoteorian mukainen kriittinen jännitys
$\sigma_{com,Ed}$	[N/mm <sup>2</sup> ]	jäykisteen keskilinjän kohdalla tehollisen poikkileikkauksen perusteella laskettu puristusjännitys

## Lyhenteet

AISI	<i>American Iron and Steel Institute</i> (eng.) Amerikan rauta- ja teräsinstituutti
EC3	Eurokoodi 3. Teräsrakenteiden suunnittelu
EPS	<i>Expanded Polystyrene</i> (eng.). Polystyreenisolumuovi. Paisutetusta polystyreenimuovista valmistettu lämmöneriste. Puhekielessä styrox
FEM	<i>Finite Element Method</i> (eng.). Elementtimenetelmä, tietokonepohjaiseen mekaniikkalaskentaan sovellettava laskentamenetelmä
KRT	käyttörajatila
MRT	murtorajatila
PIR	<i>Polyisocyanurate</i> (eng.). Polyisosyanyraatti. Polyuretaanista valmistettava lämmöneriste
XPS	<i>Extruded Polystyrene</i> (eng.). Suulakepuristetusta polystyreenistä valmistettu lämmöneriste

## 1 Johdanto

Ulkoseinärakenteissa voidaan käyttää lämpörankaprofiileita estämään kylmäsiltojen muodostumista rakenteeseen. Lämpörankaprofiili on teräsprofiili, jonka uuma on rei'itetty tarkoituksena vähentää lämmönjohtavuutta, pidentämällä lämmön kulkumatkaa profiilin lävitse.

Blombergin ja Claessonin vuonna 1998 tekemien tutkimuksien mukaan, tyypillisen Skandinaviassa käytetyn lämpörankaprofiilin poikkileikkauksen omaavan profiilin uumarei'ityksen puuttumista voidaan kompensoida pienentämällä vastavan, mutta uumastaan ehjän profiilin materiaalin lämmönjohtavuutta tai profiilin poikkileikkauksen paksuutta kuudesosaan. Tällöin uumastaan ehjällä profiililla voidaan saavuttaa yhtä pieni lämmönjohtavuus kuin termorei'itetyllä profiililla. [11, s.625.]

Termorei'ityksellä saavutettava hyöty rakenteen lämmöneristävyyteen on siis erittäin merkittävä. Rei'ityksen vaikutus kestävyys ja sen huomioiminen laskennassa on paljon tutkittu aihe, josta on julkaistu tutkimuksia, laskentamenetelmiä sekä kokeellisia tuloksia.

Tämän tutkimuksen käsittelemä Z-lämpörankaprofiili asennetaan pienenemeteistä koostuvan seinäjärjestelmän vaakarivien saumoihin jäykistämään rakennetta. Kyseinen Z-lämpörankaprofiili toimii seinärakenteessa sekudääräkannattimena ja siirtää kuormia primääräkannattimille. Z-poikkileikkauksen valintaan profiilin poikkileikkaukseksi on vaikuttanut aiemmat tutkimukset, kuormituskokeet sekä tuotantotekniset seikat.

Tutkimuksen lukijan tulee huomioida, että todellisessa rakenteessa lämpörankaprofiili asennetaan vaakatasoon niin, että profiilin uuma on lappeellaan rakenteessa. Tutkimuksessa käytetään kuitenkin termejä ylälaippa ja alalaippa. Ylälaippa tarkoitetaan seinärakenteen ulkopuolelta kohdistuvan tuulikuorman vaikutuksesta yleisessä tilanteessa puristuvaa laippaa. Vastaavasti alalaippa on laippa, johon samainen tuulikuorma yleisessä tilanteessa aiheuttaa vetorasitusta.

## 1.1 Tausta

Insinööritö toteutetaan Ramboll Finland Oy:lle Finnfoam Oy:n toimeksiannosta. Tutkimus käynnistettiin osana tuotekehitysprojektia, jossa markkinoilla jo olevasta tuotteesta pyritään kehittämään uusi versio.

Finnfoam Oy on tehnyt yhteistyötä Ramboll Finland Oy:n kanssa aiemmin vastaavanlaisissa projekteissa. Tässä projektissa on kyse rakenteen mekaanisen kestävyuden tarkastelusta, johon Ramboll Finland Oy voi tarjota eriomaisesti asiantuntemustaan rakennusalan suunnitteluun ja konsultointiin erikoistuneena toimijana.

Finnfoam Oy:n tuote FF-Wall on seinäjärjestelmä, joka rakentuu Finnfoam Oy:n itse valmistamista lämmöneristelevyistä. FF-Wall-tuote on suunniteltu eristepaksuudeltaan vastaamaan seinärakenteille sopivaa lämmöneristävyttä ja on paksuudeltaan noin 250 mm. Finnfoam Oy:n tavoitteena on kuitenkin laajentaa tuotevalikoimaa kehittämällä FF-Wall-tuotteesta aiempaa ohuempi lämmöneristepaksuudeltaan 100 – 150 mm paksu rakenne. Uutta ohuempaa rakennetta voitaisiin mahdollisesti käyttää sääoloiltaan suopeammilla alueilla tai toissijaisissa rakennuksissa, joissa vaatimukset lämmöneristävyydelle eivät ole yhtä vaativat.

Uusi aiempaa rakennetta ohuempi seinäjärjestelmä vaatii myös uuden lämpörankaprofiilin suunnittelun aiempien profiilien ollessa liian suuria uuteen rakenteeseen. Tämä työ keskittyy kyseisen, aiempaa pienemmän profiilin suunnitteluun.

## 1.2 Tutkimuksen tavoitteet ja rajaus

Tämä tutkimus tarkastelee uumareititettua teräsrankaa, eli lämpörankaa seinäjärjestelmän jäykistävänä vaakarakenteena. Tutkimus rakentuu lämpörankaisen seinäjärjestelmän tuotekehitysprosessin ympärille.

Tuote jota tutkimus kehittää on nimeltään FF-Wall. FF-Wall-seinäjärjestelmässä eristelevyelementit tuetaan vaakariveittäin teräksisillä Z-lämpörankaprofiileilla. Tutkimuksen tarkoituksena on suunnitella ja mitoittaa kyseiseen seinäjärjestelmään Z-lämpörankaprofiili. Mitoituksen lisäksi tarkastellaan profiileilla saavutettavaa jänneväliä.

Tutkimus rajataan tarkastelemaan uumarei'itetyn teräsranan mekaanisia ominaisuuksia seinäjärjestelmässä. Tutkimus ei ota kantaa seinärakenteen rakennefysikaaliseen toimitaan, näin ollen lämpö-, tai kosteusteknistälaskentaa ei suoriteta osana tutkimusta, myöskään kustannuslaskentaa ei suoriteta.

### 1.3 Tutkimusmenetelmät

Tutkimus koostuu kirjallisuusosuudesta, käsinlaskentaosuudesta sekä FEM-laskentaosuudesta. Kirjallisuusosiossa käydään läpi seinäjärjestelmätuotteen rakenne ja esitellään lämpörankaprofiileiden valmistusprosessia ja ominaisuuksia.

Laskentaosuus on merkittävin osa tutkimusta. Työ keskittyy soveltamaan Eurokoodi 3:a lämpörankaprofiilin mitoituksessa. Koko poikkileikkausta käsitellään Eurokoodin mukaisessa poikkileikkausluokassa 4. Profiilin uuman termorei'itys huomioidaan laskennassa käyttämällä Salhabin ja Wangin (2008) kehittämää mitoitusmenetelmää, jolla uuman paksuutta pienennetään redusointikertoimella.

Tarkasteltavat ilmiöt sekä laskennan vaiheet esitellään kirjallisessa osuudessa. Varsinaisia laskelmia esitetään tutkimuksen liitteinä.

FEM-laskenta osuudessa tarkastellaan käsinlaskennan kanssa yhtenäisiä profiileja, tarkoituksena saavuttaa hyvää korrelaatiota tuloksissa. FEM-laskentaan tehdään malli, joka vastaa seinärakennetta. Tähän rakenteeseen kohdistetaan kuormia käsinlasketun mukaisesti. Tämän jälkeen saatuja FEM-laskennan tuloksia verrataan käsinlaskennan tuloksiin, tavoitteena saada varmuutta käsinlaskennalle. Rakenteelle tullaan tekemään myös kuormituskokeita, mutta ne rajautuvat tämän insinöörityön ulkopuolelle aikataulusyistä.

### 1.4 Tutkimuksen toimeksianto

Tutkimus toteutetaan Ramboll Finland Oy:lle Finnfoam Oy:n toimeksiannosta. Tutkimus kehittää Finnfoam Oy:n patentoimaa tuotetta FF-Wall. Seuraavissa luvuissa on lyhyt esittely tutkimuksen kannalta merkittävimmistä osapuolista.

#### 1.4.1 Ramboll Finland Oy

Ramboll on alkujaan Tanskassa vuonna 1945 perustettu yritys. Ramboll on kansainvälinen toimija, joka tarjoaa asiakkailleen rakennusalan suunnittelu- ja konsultointipalveluita.

Ramboll Finland Oy:n juuret johtavat 1962 perustettuun yritykseen Viatek. Vuonna 2003 Viatekistä tuli osa Ramboll-konsernia. Nykyään Ramboll-konserni työllistää 13000 asiantuntijaa maailmanlaajuisesti. Näistä Suomessa, Ramboll Finland Oy:n palveluksessa työskentelee 2200 henkilöä. [1.]

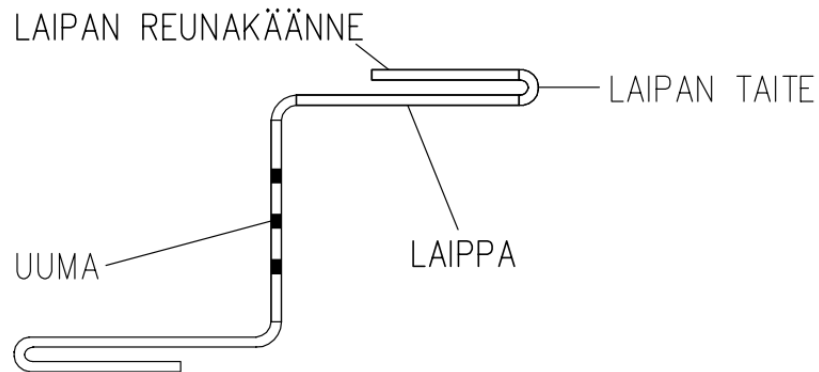
#### 1.4.2 Finnfoam Oy

Finnfoam Oy on vuonna 1982 perustettu yritys. Yrityksen päätuotteena on polystyreenistä valmistettavat lämmöneristelevyt. Finnfoam-konserni on kansainvälinen toimija, jolla on palveluksessaan henkilöstöä 140.

Konsernin suurin tehdas sijaitsee Suomessa, Salossa. Salon tehtaan kapasiteetti tuottaa XPS-eristettä on noin 1.2 miljoonaa kuutiota vuodessa. Tämä määrä on yli kaksinkertainen verrattuna koko Suomen markkinoihin. Suomen tuotannon lisäksi Finnfoamilla on tuotantolaitoksia Liettuassa, Espanjassa ja vuoden 2018 alusta lähtien myös Ruotsissa. [2.]

## 2 Tutkimuksen lähtökohdat ja taustatiedot

Tutkimuksen tavoitteena on mitoittaa teräksinen Z-lämpörankaprofiili kolmella ainepaksuudella pienen elementti seinäjärjestelmään ja laskea maksimijännevälit profiileille. Finnfoam Oy:n seinäjärjestelmä on tuotenimeltään FF-Wall. Kuvassa 1 on AutoCAD-ohjelmalla tehty piirustus tutkimuksen käsittelemästä Z-profiilin poikkileikkauksesta.



Kuva 1. Tutkimuksessa mitoitettavan Z-profiilin poikkileikkaus ja sen osat. Sekä vedetyssä että puristetussa laipassa on reunakäännö, joka lisää poikkileikkauksen kapasiteettia. Uuman rei'itys puolestaan vähentää kapasiteettia.

FF-Wall-tuotetta on saatavilla tällä hetkellä noin 250 mm paksuna, hyvin Suomen vaatiin sääoloihin soveltuvana ja lämpöä tehokkaasti eristävänä seinänä. Tutkimuksen tavoitteena olisi kehittää vastaavan tyyppinen tuote, jonka paksuus olisi kuitenkin vain 100 - 160 mm ja vastaavasti lämmöneristävyys aiempaa tuotetta alhaisempi.

Uusi aiempaa ohuempi seinärakenne avaisi uusia mahdollisuuksia tuotteen viennille Suomen sääoloja lämpimämpiin kohteisiin. Ohuempi rakenne voisi toimia myös aiempaa kustannustehokkaammin toissijaisissa rakennuksissa, kuten varastoissa ja halleissa.

## 2.1 FF-Wall-seinäjärjestelmä

FF-Wall-seinäjärjestelmää voidaan käyttää laajasti lähes kaikentyyppisissä rakennuksissa, rakennuksen ulkovaipan toteutuksessa. Käyttökohteita ovat niin teollisuus- ja varistorakennukset, liike- ja toimitilarakennukset kuin asuntorakennuksetkin. FF-Wall sopii niin betoni-, teräs- kuin puurunkoisiin rakennuksiin. Kuvassa 2 Finnfoam Oy:n tehdas Keski-Ruotsissa Kristinehamnissa. [2.]



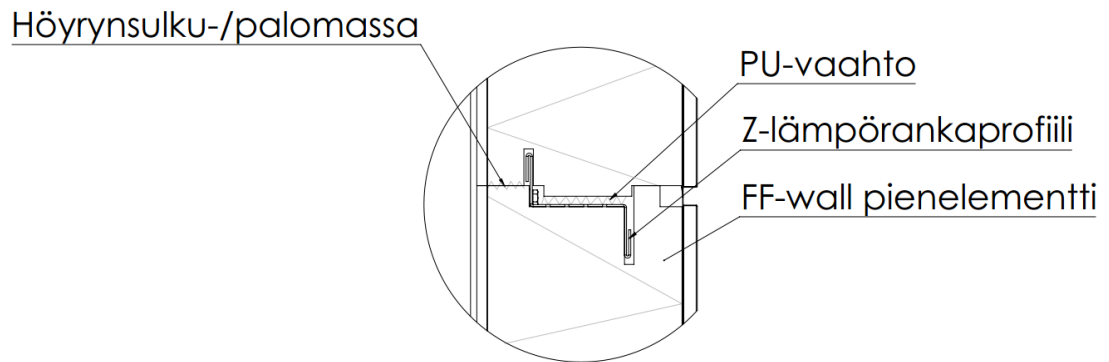
Kuva 2. Ruotsissa sijaitsevan Finnfoam Oy:n tehtaan julkisivu on toteutettu FF-Wall tuotteella. [4.]

### 2.1.1 Seinäjärjestelmän rakenne

FF-Wall-seinäjärjestelmä koostuu 600 x 1200 mm ja 600 x 2400 mm kokoisista pienenementeistä. Elementit ovat materiaaliltaan EPS- tai PIR-lämmöneristettä, joiden ulko- ja sisäpinnoille on teollisesti kiinnitetty pintamateriaali. Pienenementit asennetaan vaakasuuntaisesti rivi kerrallaan. Asennus perustuu elementteihin tehtyihin pontteihin, joilla saavutetaan tiivis ja yhtenäinen lämmöneristyskerros. Lämpörankaprofiilin ja lämmöneristeaihion muodostamalle yhdistelmä rakenteelle on myönnetty patentti.



Kunkin pienen elementtirivin vaakasaumaan asennetaan Z-lämpörankaprofiili, joka jää kauttaaltaan lämmöneristeen sisään. Uumastaan termorei'itetty Z-profiili estää tehokkaasti kylmäsilan muodostumista rakenteeseen. Lisäksi lämmöneristämisen varmistamiseksi profiilin päälle on varattu vaahdotustila, joka vaahdotetaan polyuretaanivaahdolla. Polyuretaanivaahdon lisäksi rakenteen saumaan asennetaan höyrynsulkumassa, joka toimii myös palosuojamassana. Kuvassa 3 esitetään poikkileikkaus FF-Wall-seinärakenteesta. [2.]



Kuva 3. FF-Wall-seinärakenteen poikkileikkaus eriste-elementtien saumakohdasta, johon Z-lämpörankaprofiili asennetaan. [4.]

### 2.1.2 Seinäjärjestelmän edut

FF-Wall-seinäjärjestelmällä voidaan toteuttaa tiivis lämmöneristekerros seinärakenteeseen. FF-Wall antaa myös laajat mahdollisuudet pintamateriaalien valintaan, niin seinärakenteen sisä- kuin ulkopintaankin. Pintamateriaali valitaan käyttökohteen mukaan sopivaksi.

Tuotteella voidaan rakentaa kaikkien paloluokkien vaatimukset täyttäviä rakennuksia. Palosuojaus suunnitellaan aina rakennuksen paloluokan mukaan. Eristelevyjen pintaratkaisulla sekä sisä- ja ulkopintojen verhoilulla voidaan vaikuttaa palonkestävyyteen. Eristelevyjen pinnan hiiltyminen palotilanteessa hidastaa palon etenemistä samoin kuin puun palaessa.

FF-Wall-tuotteella saavutetaan paras sisäilmaluokka M1. Lisäksi tuotteen valmistusprosessi on ekologinen. [2.]

## 2.2 Lämmöneristeet tarkasteltavassa rakenteessa

FF-Wall-seinäjärjestelmässä käytetään Finnfoam Oy:n valmistamaa EPS tai PIR-lämmöneristettä. Finnfoamin valmistaman EPS-eristeen tuotenimi on FF-EPS. Vastaavasti PIR-eristeen tuotenimi on FF-PIR. Finnfoam-tuotenimeä kantaa yrityksen valmistama XPS-eriste.

XPS-eristettä ei suositeta rakenteessa sen hieman heikomman lämmöneristävyyden vuoksi. Taulukossa 1 esitetään FF-Wall-tuotteessa käytettävien EPS-, PIR- ja XPS-lämmöneristeiden arvoja.

Taulukko 1. Finnfoam Oy:n EPS-, XPS- ja PIR-lämmöneristemateriaalien ominaisuudet. Taulukkoon on lisätty vertailun vuoksi tyypillisen mineraalivillan vastaavat arvot. [2.], [26, s.7]

Eriste	Lämmönjohtavuus W/(mK)	Tiheys kg/m <sup>3</sup>
FF-EPS	0.031	18
Finnfoam	0.035	32
FF-PIR	0.022	30 - 40
Mineraalivilla	0.032 – 0.041	30 - 100

### 2.2.1 EPS-lämmöneriste

EPS (*Expanded polystyrene*) on polystyreenistä valmistettava lämmöneriste. EPS-lämmöneriste tunnetaan puhekielessä nimellä Styrox. Vanhasta tuotenimestä puhekieleen johtuva termi Styrox eroaa kuitenkin merkittävästi nykyaikaisista EPS-lämmöneristetuotteista.

EPS-lämmöneristeen valmistusprosessissa paisuttaessa tai suulakepuristettaessa käytetään ponneaineena pentaania, joka korvaantuu ilmalla valmistusprosessin aikana. Valmiin EPS-lämmöneristeen tilavuudesta suurin osa onkin ilmaa. Eristyskyky perustuu tämän ilman paikalla pysymiseen eristeessä.

EPS-lämmöneristeiden hyvinä puolina voidaan mainita niiden hyvä lämmöneristävyys ja hyvät kosteustekniset ominaisuudet. EPS ei ime itseensä kapillaarisesti vettä ja on kestävä kosteutta vastaan.

Paloteknisesti EPS-lämmöneristeet luokitellaan palaviksi rakennusmateriaaleiksi. Yleisesti EPS-lämmöneristeiden palaminen tulipalossa on epätäydellistä ja niistä muodostuu hiilimonoksidia, savua ja nokea. Palo-ominaisuuksia voidaan parantaa käyttämällä valmistusprosessissa paloa hidastavia aineita. Tällöin puhutaan palosuojaetuista EPS-lämmöneristeistä.

Vuoden 2013 loppupuolella Finnfoam Oy toi oman EPS-lämmöneristeensä markkinoille. Verrattuna perinteisiin EPS-lämmöneristeisiin Finnfoamin uudella valmistusmenetelmällä tuotettu tuote on lämmöneristävyydeltään parempi. Finnfoamin EPS-eristeen FF-EPS:n lämmönjohtavuus on  $0.031 \text{ W/(mK)}$ . Yleisesti EPS-lämmöneristeiden lämmönjohtavuus vaihtelee välillä  $0.030 - 0.039 \text{ W/(mK)}$ . [2.], [26, s.7-8]

### 2.2.2 PIR-lämmöneriste

PIR (*Polyisocyanurate*) eli polyisosyanyraatti on polyuretaanista valmistettavaa muovia. PIR soveltuu erinomaisesti eristeiden valmistukseen pienen lämmönjohtavuutensa vuoksi. PIR-lämmöneristeellä voidaan toteuttaa ohut, mutta hyvin eristävä rakenne.

PIR-levyjen pinta on itsestään jo varsin tiivis, mutta eristelevyissä tiiveyttä parannetaan usein entisestään lisäämällä levyn pintaan laminaatti. Näin saadaan aikaan täysin höyrytiivis rakenne, jossa ei esiinny konvektiota. Esiintyessään konvektio voi heikentää huokoisten eristeiden laskennallista eristyskykyä jopa 40 prosenttia.

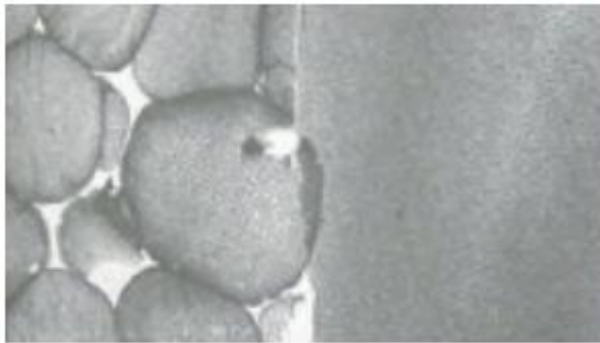
PIR-lämmöneristelevyjen huonoja puolia on sen pienehkö pitkäaikainen puristuslujuus, joka on vain 20 kPa. Tämä rajoittaa sen käyttöä kuormitetuissa rakenteissa. FF-PIR-eristeen lämmönjohtavuus on  $0.022 \text{ W/(mK)}$ . [2.], [26, s.9]

### 2.2.3 XPS-lämmöneriste

XPS (*Extruded polystyrene*) on suulakepuristettua polystyreeniä. Valmistusprosessissa korkeassa paineessa sulaan polystyreeniin liuotetaan hiilidioksidia, näin polystyreenistä muodostuu yhtenäinen, täysin suljettu solurakenne. Yksittäisen solun halkaisija valmiissa tuotteessa on alle 0.1 mm.

Finnfoam Oy:n volyymiltaan suurimpana yksittäisenä tuotteena tuottama XPS-lämmöneriste kantaa tuotenimeä Finnfoam. Verrattuna useimmille tutumpaan Styroxiin, oikealta nimeltään EPS-eristeeseen, XPS on huomattavasti tiiviimpää. Tästä esimerkki kuvassa 4.

XPS-lämmöneriste on hyvin monikäyttöinen. Tämä perustuu pitkälti sen hyvään kestävyteen kosteutta, jäätymistä ja kuormitusta vastaan. Sitä voidaan käyttää niin routaeristeenä kuin rakennuksen vaipan eristämisessäkin. Finnfoamin lämmönjohtavuus on  $0.035 \text{ W/(mK)}$ . [2.]



Kuva 4. Kuvassa on vasemmalla puolella EPS-lämmöneristettä ja oikealla puolella XPS-lämmöneristettä. Mikroskoopin kuvasta voidaan havaita ero aineiden tiheydessä. [3.]

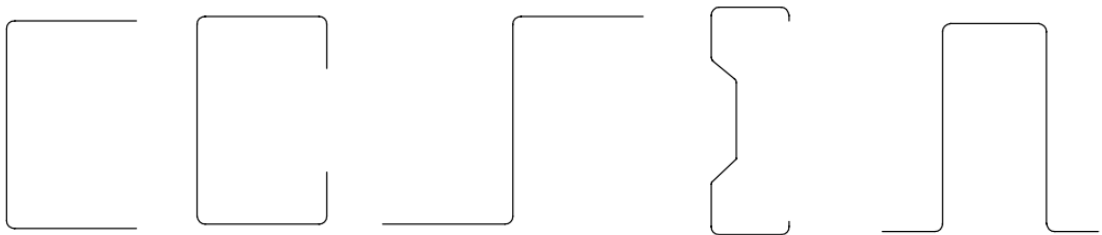
### 3 Kylmämuovattu uumarei'itetty teräsohutlevyranka

Kevyiden teräsrakarakenteiden rakennusosien käyttö on yleistynyt viime vuosina merkittävästi. Ilmiö on lähtenyt liikkeelle Yhdysvalloista ja levinnyt sieltä yleismaailmalliseksi. Tuotteet ja tuotantomenetelmät ovat kehittyneet voimakkaasti, minkä ansiosta teräsrakenteet ovat kustannuksiltaan edullisia. Myös uudet innovatiiviset rakennejärjestelmät ovat lisänneet rankojen käyttöä uusissa käyttökohteissa. [8, s.583.]

Edellä lainattu, Rautaruukki Oyj:n kehityspäällikön Jukka Hirviniemen vuonna 2001 kirjoittaman tekstin innovatiivisiin rakennejärjestelmiin voidaan lukea FF-Wallin kaltainen seinäjärjestelmä. Tämän kaltaisessa seinäjärjestelmässä yhdistyy eristeen lämmöneristävyys ja teräksisen uumarei'itetyn teräsohutlevyrangan rakennetta jäykistävät ominaisuudet. Uuman rei'ityksen ansiosta ranka voidaan asentaa seinärakenteeseen ilman että kylmäsilta syntyy rakenteen läpi.

Uumarei'itetystä teräsohutlevyrangasta voidaan käyttää myös nimityksiä termoranka tai lämpöranka. Kyseessä on joka tapauksessa teräksinen profiili, jonka uuma on rei'itetty. Rei'ityksen tarkoituksena on vähentää lämmönjohtavuutta profiilissa pidentämällä lämmön kulkureittiä uuman läpi.

Pääsääntöisesti termorankojen poikkileikkaukset ovat U-, C-, Z-, sigma- tai hattuprofiileja, joiden korkeus vaihtelee välillä 100 – 400 mm. Näiden profiilien poikkileikkaukset on esitetty kuvassa 5. Termoreikärievien lukumäärä vaihtelee profiilin korkeudesta ja halutusta lämmönjohtavuudesta riippuen, yleisesti kuitenkin rivejä on kuudesta kymmeneen. [7, s.14]



Kuva 5. Vasemmalta oikealle U-, C-, Z-, sigma- ja hattuprofiilien poikkileikkaukset.

Termorei'itettyssä profiilissa tulee huomioida laippojen koon vaikutus profiilin lämmönjohtavuuteen. Höglundin ja Burstrandin (1998) tutkimuksissa lämpörankaprofiileista seinärakenteessa todetaan, että laipat toimivat lämpöä keräävinä osina profiilia. Tämä tarkoittaa

taa, että laippojen leveyden pienentäminen vaikuttaa merkittävästi profiilin lämmönjohtavuuteen. Lyhempien laippojen käyttö profiilissa heikentää kantavuutta, mutta toisaalta vähentää profiilin lämmönjohtavuutta. [5, s.91.]

Seuraavissa alaotsikoissa käsitellään ensin terästä materiaalina, sitten termorankaprofiilien aihioita eli ohutlevyrankaprofiileja ja niiden valmistusta. Tämän jälkeen käsitellään varsinaisen termorei'ityksen tekemistä ohutlevyrankaprofiileihin ja lopuksi uuman rei'ittämisen vaikutuksia profiiliin.

### 3.1 Teräs materiaalina

Materiaalina teräs itsessään on täysin kierrätettävissä ilman laatuhäviötä. Huomioitavaa on myös, että teräsprofiilit on mahdollista tilata työmaalle määrämittäisinä joka helpottaa asennustyötä ja materiaalihukkaa. FF-Wall-tuotteessa tämä toteutuu erinomaisesti, koska seinäjärjestelmä perustuu keskenään symmetristen Z-profiilien käyttöön.

Teräs on epäorgaaninen materiaali, jonka vuoksi sen käyttö orgaanisen materiaalin tilalla pienentää mahdollisia home- ja kosteusongelmia rakenteessa. Epäorgaanisuuden vuoksi teräksestä ei myöskään vapaudu orgaanisia yhdisteitä, jotka voisivat aiheuttaa esimerkiksi allergisia reaktioita ihmisillä.

Vaikkakin kylmissä olosuhteissa kuten Suomessa, teräksen käyttö vaipparakenteissa on haastavaa sen korkean lämmönjohtavuuden vuoksi, on teräksellä myös paljon hyviä ominaisuuksia. Näitä ominaisuuksia päästään hyödyntämään termorei'ityksen kaltaisten innovaatioiden avulla. [7, s.14]

Teräksen hyväksi ominaisuuksiksi voidaan lukea muihin yleisiin rakennusmateriaaleihin verrattuna hyvä lujuus-painosuhte, joka mahdollistaa keveiden, mutta hyvin kantavien rakenteiden toteuttamisen. Myös liitosten tekeminen on verrattain helppoa. Teräksen liitokset toteutetaan kiinnikkein tai hitsaamalla.

Teräs on homogeeninen materiaali, tämä helpottaa suurehkojen muutosten tekemistä myös valmiisiin rakenteisiin. Valmistusvaiheessa puolestaan teräkselle voidaan muokata haluttuja ominaisuuksia ja profiileita voidaan tuottaa mittatarkasti niin, että työmaalle saapuessa profiileita ei tarvitse enää työstää. Tämä vähentää merkittävästi työvaiheita

työmaalla, sekä materiaalihävikkiä koko prosessissa. Teräs on myös palamaton aine, jolla on hyvä kulutuskestävyys ja jossa oikein suunniteltuna korroosio etenee yleensä suhteellisen hitaasti. [16.]

### 3.2 Ohutlevyrankaprofiileiden valmistus

Termorankaprofiilit valmistetaan teräksisestä kylmämuovatususta teräsohutlevyrangasta, rei'ittämällä uuma termorei'in. Ainevahvuus termorankaprofiileissa vaihtelee yleisesti 0,7 – 2,0 mm välillä. [7, s.14.]

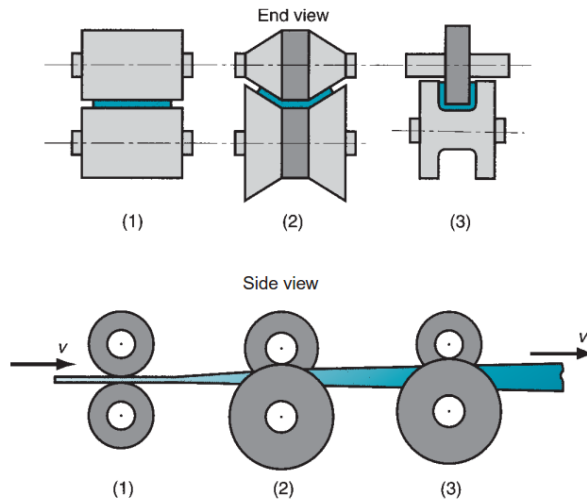
Kylmämuovatusalle teräsohutlevyrangalle on kaksi yleistä valmistusmenetelmää, rullamuovaus ja särmäys. Kyseiset menetelmät ovat niin sanottuja kylmämuovausmenetelmiä, eli terästä työstetään ilman erillistä lämmitystä tai sulatusta. [12, s.43-44.]

Kylmämuovaus lujittaa terästä poikkileikkauksen taitekohdissa. Särmäämällä valmistettavissa tuotteissa lujittuminen on merkittävää. Särmäyksessä poikkileikkauksen taitoskohtiin ei aiheudu pituussuuntaisia jäännösvetojännityksiä. Valmistuksen yhteydessä tapahtuva myötölujittuminen voidaan huomioida suunnittelussa. Seuraavissa alaotsikoissa esitellään särmäys ja rullamuovaus kylmämuovaus menetelmät. [18, s.78.]

#### 3.2.1 Rullamuovaus

Rullamuovaus aloitetaan leikkaamalla teräsohutlevy tarkasti haluttuun määräleveyteen. Tämän jälkeen määrämittainen teräsohutlevy kulkee useiden rullaparien lomitse muovautuen vaihe vaiheelta haluttuun muotoon. Aineen paksuus ei muutu rullamuovauksen aikana, paksumpi ainevahvuus vaatii kuitenkin suuremman määrän rullapareja.

Rullamuovauksella voidaan valmistaa monimutkaisempia muotoja kuin särmäämällä. Rullamuovauksella saavutetaan myös särmäämistä suurempi tuotanto. Yksittäisen rullamuovaus laitteen lävitse voidaan ajaa teräsohutlevyä jopa 600 – 1500 metriä tunnissa. Kuvassa 6 esitetään rullamuovauksen periaate. [12, s.43-44.]

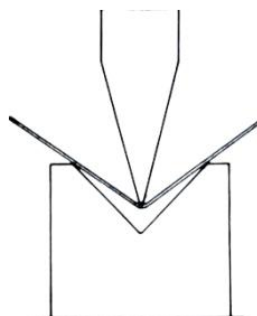


Kuva 6. Rullamuovauslinjan periaate. Kuvassa valmistuu yksinkertainen U-profiiliranka. Ylärivissä pituusleikkaus rullapareista 1, 2 ja 3. Alarivissä samoista rullapareista poikkileikkaus. Vektorilla  $v$  esitetään rangon etenemissuunta. [25.]

### 3.2.2 Särmäys

Särmäyksessä valmiiksi määräleveyteen leikattu levyaiho taivutetaan haluttuun muotoon. Särmäyksessä käytettävä laite on särmäyspuristin. Särmäyskoneessa yleisesti hydraulikalla tuotettu puristusvoima puristaa taivuttavaa työkalua paininta, koneessa olevaa vastinta, vasten. Painimen ja vastimen väliin asetettu teräsohutlevy taipuu näin ollen haluttuun muotoon. Kuvassa 7 havainnollistetaan särmäämistä. [13, s.25.]

Särmääminen on rullamuovausta edullisempaa pienillä tuotantoerillä työkalu- ja asetus- kustannusten vuoksi. Rullamuovaus tulee kuitenkin jo pienillä sarjoilla edullisemmaksi kuin särmäys jos työkaluja ei tarvitse erikseen hankkia. [12, s.44.]



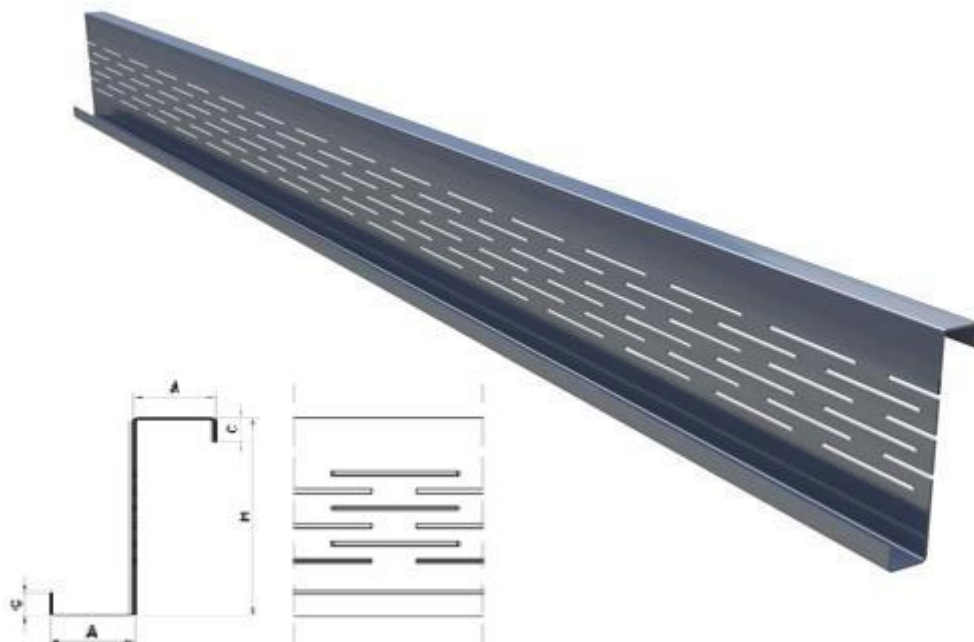
Kuva 7. Kuviossa esitetään särmäyksen periaate. Kuvan esittämä menetelmä on vapaataivutus, joka tunnetaan myös kolmipistetaivutuksena. [14.]



### 3.3 Ohutlevyrankaprofiileiden termorei'ityksen toteuttaminen

Termorei'itys tehdään leikkaamalla teräsohutlevyn uumaan halutun kokoiset reiät. Yksi tähän käytettävä teräksen käsittely menetelmä on meistaus, mutta reiät voidaan leikata myös muilla tavoin. [9, s.5.]

Termoreikärivien lukumäärä vaihtelee profiilin korkeuden ja halutusta lämmönjohtavuudesta riippuen, yleisesti rivejä on kuudesta kymmeneen. [7, s.14]. Thöyrän (2001) mukaan, reiät ovat yleensä noin 70 mm pitkiä ja kahden samassa rivissä olevan peräkkäisen reiän välissä on yleisesti 20 - 25 mm ehjää terästä. Puolestaan rivien välissä on yleisesti 6 - 9 mm ehjää terästä. Kuvassa 8 esitetään yksi esimerkki termorei'ityksestä. [9, s.6.]



Kuva 8. Esimerkki uumarei'ityksestä termorankaprofiilissa. Kuvassa Rautaruukki Oyj:n tuote Termo-orsi. Profiilin poikkileikkaus on reunajäykisteinen Z-poikkileikkaus, jonka laipoissa on taite, mutta ei kuitenkaan reunakäännettä. [17.]

### 3.4 Termorei'ityksen vaikutus poikkileikkauksen kapasiteettiin

Kestin (2000) suorittamissa tutkimuksissa tarkasteltiin uumarei'itettyä poikkileikkausta laskennallisesti sekä kokeellisin menetelmin. Tutkimuksen tuloksena ositettiin, että uuman termorei'ittäminen vähentää uuman poikittaista taivutusjäykkyyttä joka vähentää erityisesti vinoutumisnurjahduskestävyyttä. [15, s.94.]

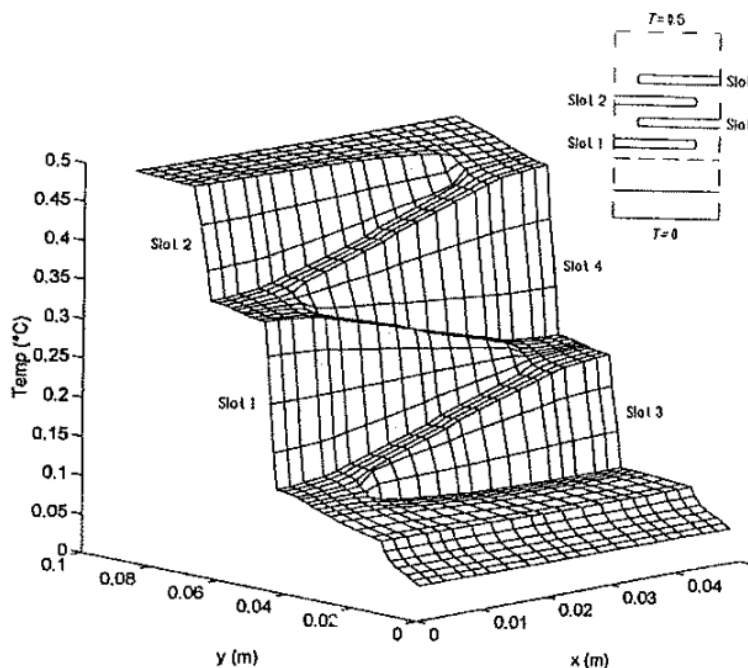
Myös Thöyrä (2001) tutki lisensiaattityössään uumarei'ityksen vaikutusta teräsrangan kuormankantokykyyn. Thöyrä suoritti yhteensä 36 kuormituskoetta. Tavoitteena oli selvittää, kuinka analyyttinen malli toimii verrattaessa sitä koetuloksiin. Thöyrän mukaan uuman rei'ittäminen vähentää teräsrangan taivutusjäykkyyttä sekä leikkauskestävyyttä. [9, s.91.] Näitä voidaan kompensoida lisäämällä uumaan erilaisia taitoksia tai urituksia, jotka toimivat rangon jäykisteinä. [7, s.15.]

On selvää, että uuman rei'ittäminen vaikuttaa poikkileikkauksen kapasiteettiin pienentäen sitä. Kuitenkin rei'ityksen ansiosta lämmönjohtavuus pienenee, joka osaltaan mahdollistaa teräksisten rankojen käytön rakennuksen vaipassa. Vaikutuksesta lämmönjohtavuuteen kerrotaan tarkemmin seuraavassa kappaleessa.

### 3.5 Termorei'ityksen vaikutus lämmönjohtavuuteen

Termorei'ityksen vaikutus profiilin lämmönjohtavuuteen on erittäin merkittävä. Merkittävää rakenteen kuormankantokapasiteetin kannalta on, että termorei'ityksen avulla voidaan kasvattaa teräsrangan paksuutta ilman, että lämmönjohtavuus uuman läpi kasvaa ylitsepääsemättömästi. [7, s.16.]

Blomberg ja Cleasson (1998) tutkivat termorei'ityksen vaikutusta seinärakenteen lämmönjohtavuuteen. Blombergin mukaan useat lähteet arvioivat, että teräksisten rei'ittämättömien pilareiden käyttäminen seinärakenteen sisällä kantavana rakenteena heikentää seinän lämmöneristävyyttä 30 – 50 prosenttia. Uuman rei'itys kohtisuorasti lämmönkulkeutumissuuntaa vastaan on tehokas keino vähentää kylmäsilan muodostumista. Kuva 9 havainnollistaa termorei'ityksen vaikutusta lämmönjohtavuuteen rei'itetyn uuman lävitse. [11, s.621.]



Kuva 9. Kuvaaja esittää simuloitua lämpötilajakaumaa termorangan uumassa. [9.]

Blombergin ja Claessonin (1998) mukaan tyypillisen lämpörankaprofiilin uumareijitys vähentää lämmönjohtavuutta merkittävästi. Vastaavan, mutta uumasta ehjän profiilin tulisi olla paksuudeltaan tai materiaalin lämmönjohtavuudeltaan kuudesosa termorei'itetystä profiilista, saavuttaakseen yhtä matalan lämmönjohtavuuden kuin termorei'itetty profiili. [11, s.625.]

#### 4 Yksittäisten termorankojen välisen liitoksen toteuttaminen

Termorankojen välinen liitos on ohutlevyrakenteiden liitos. Ohutlevyrakenteiden liitoksella on erityispiirteitä johtuen rangan pienestä ainepaksuudesta sekä usein myös epäsymmetrisestä poikkileikkauksesta. [18, s.78.]

Kahden profiilin välisen liitoksen toteutuksessa tulee huomioida liitoksen kestävyys sekä asennustekninen näkökulma. FF-Wall-seinäjärjestelmään on kehitetty tehokas liitos, jolla kaksi profiilia kiinnittyvät toisiinsa muodostaen pidemmän termorankarakenteen. Liitoksen toimivuuden varmistamiseen käytetään laskennan lisäksi kuormituskoetta. Kuormituskokeessa, jossa tarkastellaan liitoksen kestävyys lisäksi muita аспектеja, on usein perusteltua asettaa liitos kuormitetun alueen vaarallisimpaan kohtaan niin, että liitoksen tulee kestää suurin mahdollinen rasitus kokeessa.

#### 4.1 Liitoksen toteuttaminen

Ohutlevyrakenteissa liitos toteutetaan yleisesti ruuviliitoksella porautuvien tai kierrettävien ruuvein, niittiliitoksella, naulaliitoksella ammuttavien nauloin tai ruuviliitoksella tavanomaisin ruuvein ja mutterein. Tämän lisäksi teräsohutlevyillä harvemmin käytettyjä, mutta mahdollisia liitoksia ovat kitkaliitokset, vastuspistehitsaukset, MIG-pistehitsaukset, liimaliitokset ja kierrenaulaliitokset. Kaikista näistä menetelmistä parhaiten teräsohutlevyjen liittämiseen toisiinsa soveltuvia menetelmiä ovat kierrettävien tai porautuvien ruuvien käyttö ja niittaaminen. [18, s.80-81.]

Loveuksien tekeminen, sekä liittyvien teräsrankojen liittäminen toisiinsa pontein on myös yksi menetelmä parantaa liitoksen kestävyyttä. Asennusteknisesti tämänkaltaiset muokkaukset teräsrankoihin voivat helpottaa asennustyötä samalla tuoden lisävarmuutta liitokselle.

#### 4.2 Ohutlevyliitoksen suunnittelussa huomioitavat murtumistavat

Suomen Rakennusinsinöörien liiton RIL r.y:n (1992) mukaan ohutlevyrakenteiden liitoksia suunnitellessa tulee huomioida seuraavat murtumistavat:

- kiinnikkeiden leikkausmurtuminen
- kallistus- ja reunapuristuminen
- murtuminen levyn nettopoikkileikkauksessa
- levyn reunarepeytyminen
- ulosvetomurtuminen
- kiinnikkeen vetomurtuminen
- läpivetomurtuminen
- levyn taantuminen

[18, s.81]

## 5 Laskennallisen tutkimuksen teoria

Termorankaprofiilit valmistetaan teräsohutlevystä. Teräsohutlevyn pienen ainepaksuuden, valmistustekniikan sekä usein epäsymmetristen poikkileikkausten vuoksi sen mitoituksessa on huomioitavia erityispiirteitä.

Paikallinen lommahdus on erityisesti huomioitava ilmiö teräsohutlevyrakenteessa. Paikallinen lommahdus tapahtuu huomattavasti pienemmillä puristusjännityksen arvoilla kuin teräsohutlevyn myötöjännitys on. Paikallinen lommahdus ei kuitenkaan yleensä merkitse, että ohutlevyrakenteen kestävyys yläraja olisi saavutettu, vaan mitoituksessa käytetään usein hyödyksi rakenteen toimintaa ylikriittisessä tilassa. Rakenteen toiminnan tunteminen ja ylikriittisen tilan huomioiminen laskennassa ovat ohutlevyrakenteissa keskeisiä ongelmia mitoituksen kannalta. [18, s.78.]

Mitoituksessa yhdistyvät laskennallinen ja kokeellinen tutkimus. Laskenta perustuu Eurokoodiin 3 (SFS-EN 1993-1-3:2006 ja SFS-EN 1993 1-5:2006). Tutkimuksen laskentaosuuksissa sovelletaan paikoin eurokoodin 3 ehtoa, jonka mukaan riittävä varmuus laskennalle saavutetaan yhdistämällä laskelmat ja kokeelliset menetelmät. Rakenteelle on siis välttämätöntä suorittaa laskennan ohella kuormituskokeita, riittävän varmuuden saavuttamiseksi.

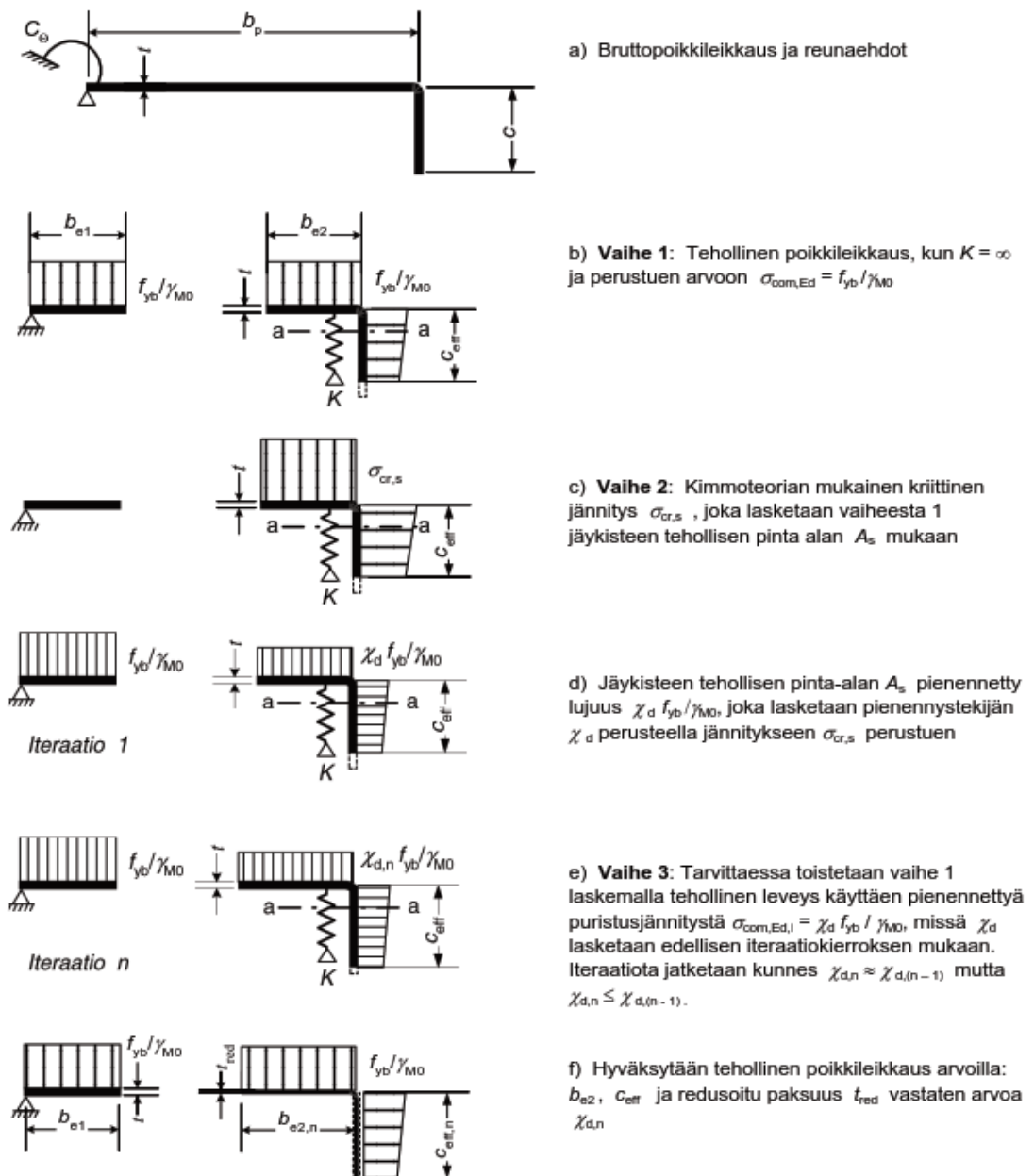
Tarkasteltavan termorankaprofiilin merkittävin mitoituksessa huomioitava kuorma on seinärakenteelle kohdistuva tuulikuorma. Tuulikuorma aiheuttaa termorankaan taivutusta, josta aiheutuu poikkileikkaukselle veto- ja puristusjännitystä.

Merkittävä huomioitava asia termorankaprofiilin laskennassa on uuman rei'ityksen huomioiminen. Tämän tutkimuksen laskentaosuudessa uuman rei'itys on huomioitu poikkileikkauksen tehollisia arvoja laskettaessa hyödyntämällä Salhabin ja Wangin (2008) kehittämää mitoitusmenetelmää, joka huomioi uuman rei'ityksen pienentämällä uuman paksuutta reduktiokertoimella. Tämän jälkeen voidaan määrittää tehollinen poikkileikkaus, jota voidaan käyttää eurokoodin mukaisessa laskennassa varsinaisessa mitoituksessa.

Tutkimuksen laskenta koostuu kolmesta päävaiheesta, jotka ovat poikkileikkaussuureiden laskenta, mitoitus ja jännevälin tarkastelu. Seuraavissa alaotsikoissa käsitellään teoria näiden laskentaosuuksien taustalla.

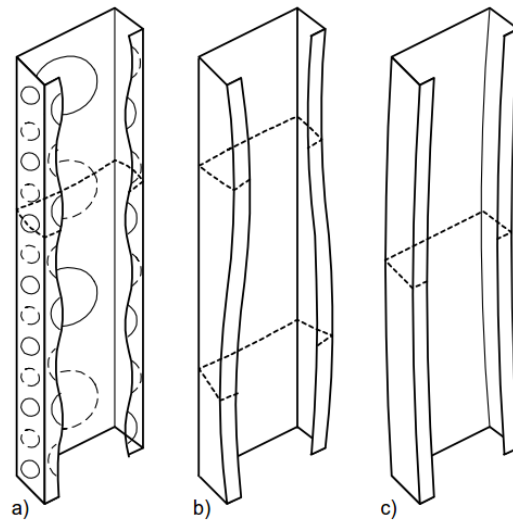
## 5.1 Poikkileikkaussuureiden laskenta

Poikkileikkaussuureiden laskenta on suoritettu Eurokoodin 3 mukaisesti (EN 1993-1-3+AC ja EN1993-1-5). Tämän on mahdollistanut uuman termorei'ityksen huomioiminen käyttämällä alaotsikossa esiteltävää Salhabin ja Wangin mitoitusmenetelmää. Eurokoodi 3 esittää reunajäkisteellisen laipan puristuskestävyyden laskennan vaiheet kuvassa 10. [7, s.16.]



Kuva 10. Eurokoodin 3 esittämät reunajäkisteellisen laipan puristuskestävyyden laskentavaiheet. [21.]

Reunajäykistetyillä avoprofiileilla puristusvoiman aiheuttamien stabiiliuuden menettämisen ilmiöt ovat merkittävimpiä tarkasteltavia ilmiöitä. Yleisesti reunajäykistetyillä avoprofiileilla ne aiheuttavat suurilta osin profiilin kuormankantokyvyn menetyksen. Pääsääntöisesti nämä ilmiöt ovat taso-osien paikallinen lommahdus tai vinoutumisnurjahdus. Kuvassa 11 esitetään teräsohutlevyn nurjahdusmuodot. [7, s.16.]



Kuva 11. Teräsohutlevyn nurjahdusmuodot: a) paikallinen lommahdus, b) vinoutumisnurjahdus, c) taivutusnurjahdus. [19.]

Paikallinen lommahdus huomioidaan tehollisen poikkileikkauksen avulla. Tehollinen poikkileikkaus jättää huomioimatta lommahtaneet osat ja näin ollen on pienempi kuin bruttopoikkileikkaus. [18, s.79.]

Poikkileikkauksen tehollisten arvojen laskenta on tämän raportin liitteinä 1. Laskennassa on esitetty seuraavat vaiheet:

- lähtötiedot
- profiilin mitat
- uuman rei'itys ja uuman rei'ityksen huomioiminen laskennassa
- käsitteelliset leveydet
- poikkileikkauksen bruttopinta-ala
- profiilin painopisteen sijainti
- profiilin bruttopoikkileikkauksen jäyhyysmomentti ja taivutusvastus
- geometristen mittasuhteiden tarkistus
- puristetun laipan puristuskestävyyden laskenta
  - puristetun laipan teholliset arvot
  - reunajäykisteen kimmoteorian mukainen kriittinen jännitys
  - iteraatio
- uuman tehollisten arvojen laskenta
  - iteraatio
- teholliset poikkileikkausarvot.

#### 5.1.1 Jäykistetyt ja jäykistämättömät levyosat

Tavanomaisesti avoprofiileilla poikkileikkaus koostuu jäykistämättömistä ja jäykistetyistä levyosista. Jäykistetty levyosa on osa, joka on tuettu molemmilta reunoilta. Jäykistämättömän levyosa puolestaan on tuettu toiselta reunaltaan, samanaikaisesti toisen reunan ollessa vapaa. Jäykistämättömän levyosan kimmoisa lommahdusjännitys on merkittävästi pienempi kuin jäykistetyn levyosan. Tätä voidaan pyrkiä kasvattamaan lisäämällä jäykistämättömään levy-osaan reunajäykiste. [7, s.16.]

Tämän tutkimuksen Eurokoodin 3 mukaisessa laskennassa, tehollista poikkileikkausta laskettaessa on huomioitu koko poikkileikkaus eli uuman, laippojen, laippojen taitosten ja laippojen reunakäänteiden leveys. Poikkileikkauksen laippojen reunajäykistettä on käsitelty kaksinkertaisena reunajäykisteenä. Kuvassa 12 esitetään profiilin todellinen poikkileikkaus ja poikkileikkauksen puristettu alue. Puristetulla alueella tulee määrittää tehollinen poikkileikkaus, joka huomioi mahdollisen puristusjännityksen aiheuttaman lommahduksen.



## Koko poikkileikkaus      Puristettu alue

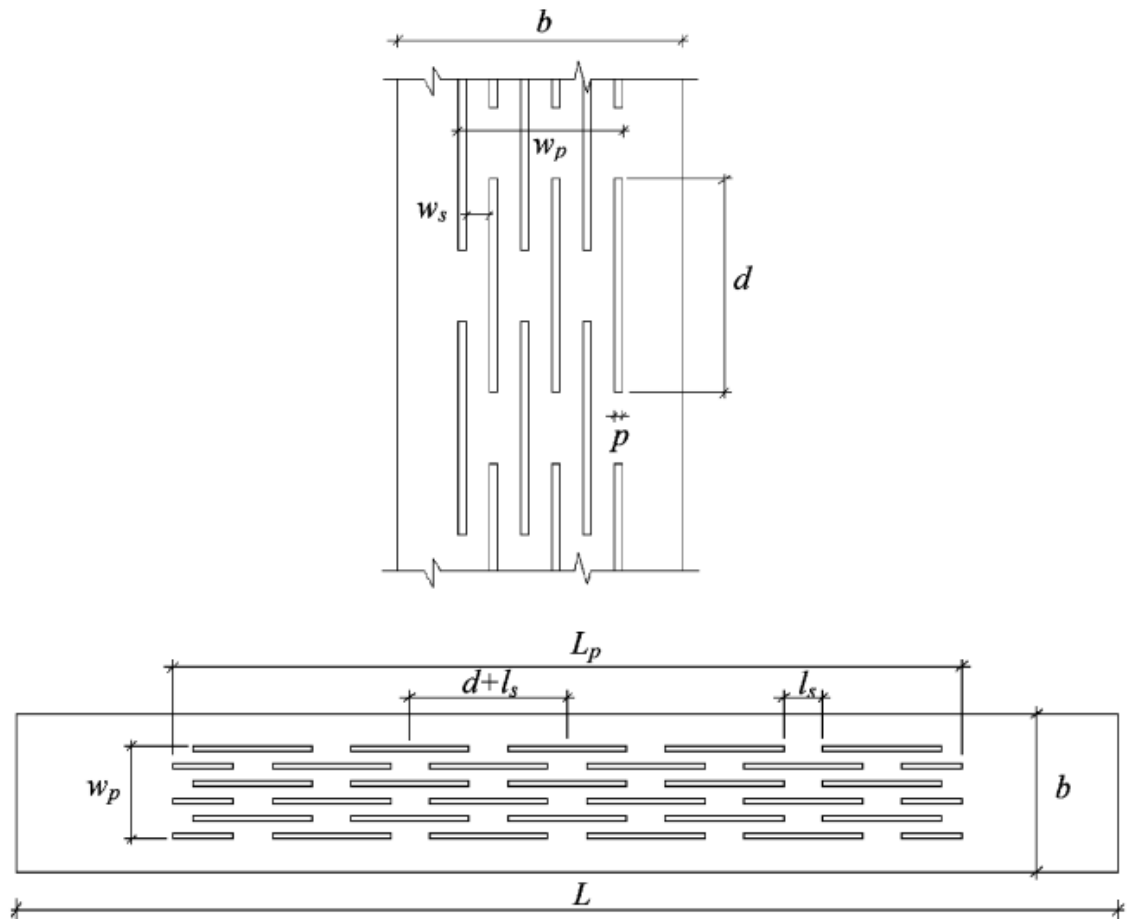


Kuva 12. Laskettaessa poikkileikkauksen tehollisia arvoja, tulee puristettua aluetta tarkastella tehollisena, jolloin poikkileikkauksen lommahtavat osat on huomioitu.

### 5.1.2 Salhab ja Wang, mitoitusmenetelmä uumareitetyille profiilille

Termorangassa poikkileikkauksen uuma on rei'itetty termorei'illä. Termorei'itys vaikeuttaa rakenteen kapasiteetin laskentaa. Vuonna 2008 Manchesterin yliopistossa Iso-Britanniassa julkaistiin B. Salhabin ja Y.C. Wangin laatima tutkimus, jonka tarkoituksena oli kehittää mitoitusmenetelmä uumareitetyyn lämpörankaprofiilin mitoitukseen. Salhabin ja Wangin mukaan aikaisemmin ei ollut esitetty hyväksyttyä suunnittelumenetelmää tämän kaltaisen rakenteen laskemiseen, vaan laskentaan saatettiin soveltaa esimerkiksi AISIn (*American Iron and Steel Institute*) menetelmää, joka kuitenkin on tarkoitettu yksittäisen reiän tarkasteluun uumassa, eikä näin ollen soveltunut termorei'itys-kuvioitun uuman laskentaan. Tästä ongelmasta alkunsa saanut Salhabin ja Wangin tutkimus kehitti menetelmän, joka huomioi poikkileikkauksen muodon sekä termorei'ityksen kuvioinnin. [6, tiivistelmä]

Salhabin ja Wangin tutkimuksen tuotoksena on kaava yleisessä muodossa. Kaavalla lasketaan uuman paksuuden reduktiokerroin, jolla termorei'itetyn uuman paksuutta pienennetään vastaamaan ehjän uuman paksuutta. Laskentamenetelmä perustuu kuvan 13 mukaisten dimensioiden käyttöön kaavoissa 1, 2a ja 2b. Kaavoilla ratkaistaan  $k_{red}$  -kerroin, jolla uuman paksuus  $t$  kerrotaan, tuloksena saadaan redusoitu uuman paksuus  $t_w$ . [6, s.828-829.]



Kuva 13. Salhabin ja Wangin mitoitusmenetelmässä uuman reduktiokertoimen laskennassa käytettävät muuttujat. [24.]

Mitoitusmenetelmässä ratkaistaan ensin muuttuja  $Y$ . Uuman redusoidun paksuuden laskennassa erittäin merkittävää on seuraavat arvot:

- levyn leveyden ja paksuuden suhde ( $b/t$ )
- uuman ehjän osan leveyden suhde uuman rei'itetyn osan leveyteen ( $w_s/w_p$ )
- yksittäisten reikien yhteenlaskettu kokonaisleveys suhteessa levyn leveyteen ( $p_b/b$ ).

Muuttujassa  $Y$  on yhdistelty näiden tekijöiden vaikutus uuman redusoidun paksuuden laskentaan. Muuttujan  $Y$  kasvaessa uuman redusoitu paksuus  $t_{red}$  pienenee.  $Y$  lasketaan kaavalla 1. [6, s.828-829.]

$$Y = \left( \frac{p_b}{b} \right)^2 \left( \frac{w_s}{w_p} \right)^{1/2} \quad (1)$$

Saatua arvoa  $Y$  käytetään laskettaessa  $k_{red}$  arvoa, kaavan 2a tai 2b mukaisesti.

*Kun  $Y \geq 0,00133$*

$$k_{red} = \frac{t_{eq}}{t} = \sqrt[3]{c_1 + c_2 Y}, \text{ missä} \quad (2a)$$

$$c_1 = 0,608 - 1,7 \frac{t}{b} \text{ ja } c_2 = 70,256 \frac{t}{b} - 18,33.$$

*Kun  $Y < 0,00133$*

$$k_{red} = \frac{t_{eq}}{t} = \sqrt[3]{1 + c_1 Y + c_2 \sqrt{Y}}, \text{ missä} \quad (2b)$$

$$c_1 = 247,13 - 3057,75 \frac{t}{b} + 2025,11 \left(\frac{t}{b}\right)^{1/2} \text{ ja } c_2 = -19,48 + 94,5 \frac{t}{b} - 84,375 \left(\frac{t}{b}\right)^{1/2}.$$

Kaavasta saatu  $k_{red}$  arvo on kerroin, jolla uuman paksuutta  $t$  redusoidaan. Uuman redusoitu paksuus on  $t_w$ . [6, s.829.]

$$t_w = k_{red} \cdot t \quad (3)$$

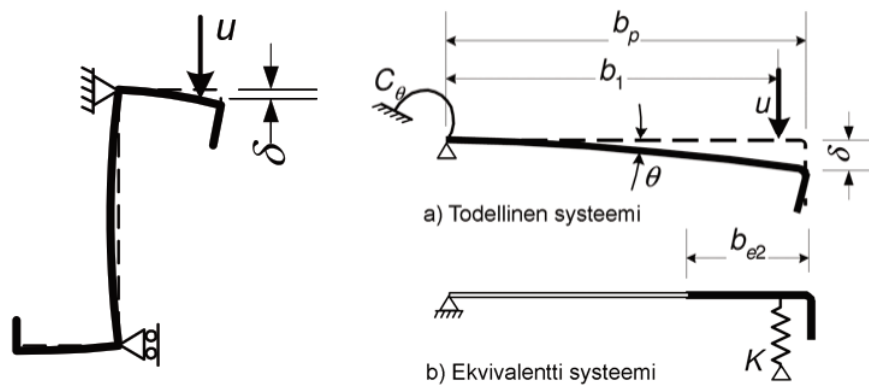
Salhab ja Wang vertasivat heidän mitoitusmenetelmällä saatuja reduktioketoimien arvoja Kestin vuonna 2000 julkaiseman tutkimuksen uuman paksuuden redusointikertoimiin, jotka oli määritetty eri menetelmällä. Tulokset ovat varsin lähellä toisiaan. Taulukossa 2 esitetään vertailu tästä. Taulukon viimeinen sarake on saatu kaavasta 2a niin, että kaava on neliöjuuressa kuutiojuuren sijaan. [6, s.830], [7, s.20.]

Taulukko 2. Salhabin ja Wangin tekemä vertailu redusointikertoimista Kestin laskemien redusointikertoimien kanssa. [6, s.830]

Plate thickness (mm)	Plate width (mm)	Kesti [7] reduction factor $k_{red,Kesti}$	Authors equations (7a,b) reduction factor $k_{red}$	Using Eq. (8) $\bar{k}_{red}$
1	150	0.72	0.796	0.708
	175	0.74	0.810	0.727
	200	0.75	0.819	0.739
	225	0.76	0.825	0.747
2	150	0.71	0.791	0.702
	175	0.73	0.806	0.721
	200	0.74	0.815	0.733
	225	0.75	0.821	0.742

### 5.1.3 Reunakäänteellisen Z-profiilin ekvivalentin systeemin kiertymäjousen määrittäminen

Eurokoodin 3 (SFS-EN 1993-1-3, 5.5.3.1.) menetelmä reunajäykisteellisen laipan tehollisen poikkileikkauksen laskentaan perustuu kiertymäjousen  $C_\theta$  käyttämisellä korvaamaan uuman ja laipan välistä reunaa. Tämän jälkeen todellinen systeemi korvataan ekvivalentilla systeemillä, jossa muuttuja  $K$  on laipan jäykkyyttä kuvaava jousi. Kuvassa 14 esitetään Eurokoodi 3:n mukainen menetelmä. [7, s.22.]



Kuva 14. Eurokoodi 3:n esittämä menetelmä jäykisteen jousen jäykkyyden määrittämisestä taivutetulle orrelle. [22.]

SFS-EN 1993-1-3:2006, 5.5.3.1(1) mukaan suunniteltaessa puristettuja osia, joihin liittyy reuna- tai välijäykisteitä, tulee olettaa, että jäykiste käyttäytyy samoin kuin jatkuvasti osittain tuettu puristettu sauva, jolla on jousimainen tuki. Tämän jousimaisen tuen jäykkyys riippuu sekä reunaehdoista että viereisten taso-osien taivutusjäykkyydestä. [23, s.25.]

Jäykisteen jousen jäykkyyttä kuvataan muuttujalla  $K$ . Sen arvo lasketaan yksikkökuorman  $u$  avulla kuvan 11 mukaan. Jousen jäykkyys  $K$  yksikköpituutta kohti saadaan kaavasta 4:

$$K = \frac{u}{\delta} \quad (4) \quad \text{EC3 (5.9)}$$

$\delta$  on jäykisteen siirtymä yksikkökuormasta  $u$ , joka vaikuttaa poikkileikkauksen tehollisen osan painopisteessä. Kuvassa 14 mitta  $b_1$  [23, s.23]

Reunakäänteellisen Z-profiilin tapauksessa, y-y-akselin suhteen taivutetulle palkille, jousen jäykkyyden arvoksi saadaan:

$$K = \frac{Et^3}{4(1-\nu^2)} \frac{1}{b_1^2 h_w + b_1^3} \quad (5) \quad \text{EC3 (5.10b)}$$

Eurokoodin mukainen, kaava 5 ei kuitenkaan sovellu tutkimuksessa tarkasteltavalle termorangalle, koska se ei huomioi uuman rei'ityksestä aiheutuvaa redusoitua paksuutta. Sinisalo (2017) esittää menetelmän, jolla redusoidun paksuuden vaikutus voidaan huomioida. Tämä tapahtuu laskemalla reunajäykisteen taipuma yksikkövoimasta ja sijoittamalla taipuma kaavaan 7. Reunajäykisteen taipuma  $\delta$  määritetään yksikkövoimaperiaatteella kaavan 6 mukaan [7, s.23]:

$$\delta = \frac{\int_0^L M^2 ds}{D} \quad (6)$$

$M$  on yksikkövoiman  $u$  aiheuttama momenttipinta

$D$  on taso-osan taivutusjäykkyys, kaavasta 4.

[7, s.23]

$$D = \frac{Et^3}{12(1-\nu^2)} \quad (7)$$

Integroimissääntöjen perusteella voidaan todeta, että:

$$\int_A^C M^2 ds = \int_A^B M^2 ds + \int_B^C M^2 ds \quad (8)$$

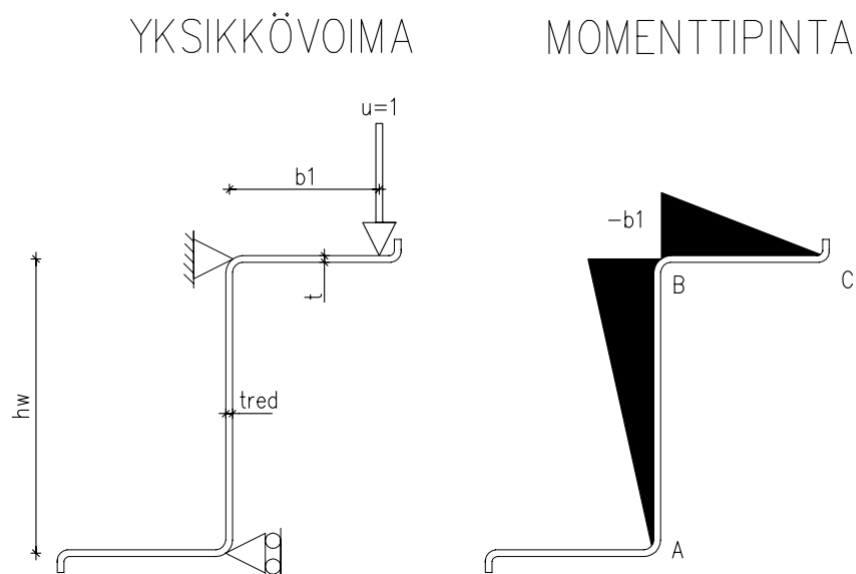
[7, s.22-24]

Integraalin laskemiseksi sovelletaan Laineen (1993) kaavaa kolmion muotoisen momenttipinnan integraaliin sauvan pituuden yli. Tällöin integraali voidaan kirjoittaa kaavan 9 osoittamaan muotoon. Kuvassa 15 esitetään yksikkövoimasta aiheutuva momenttipinta. [7, s.24], [20, s.28.]

$$\int M^2 ds = \frac{s}{3} y_2^2 \quad (9)$$

$s$  on poikkileikkauksen osan pituus

$y_2$  on sauvanpäämomentti sauvan päässä 2



Kuva 15. Yksikkövoiman aiheuttama momenttipinta Z-profiilissa.

Sijoitetaan kaavat 7, 8 ja 9 kaavaan 6. Kuvan 15 merkinnöillä jäykisteen siirtymäksi yksikkökuormaksi saadaan [7, s.24]:

$$\delta = \frac{4(1-\nu^2)}{E} \left( \frac{h_w b_1^2}{t_w^3} + \frac{b_1^3}{t^3} \right) \quad (10)$$

jossa  $t_{red} = t_w$ .

Tämän jälkeen sijoitetaan kaava 10 kaavaan 4. Tällöin kaava huomioi kunkin yksittäisen taso-osan paksuuden.

Reunakäänteellisen Z-profiilin, y-y-akselin suhteen taivutetun palkin, jonka uuman paksuus on erisuuruinen kuin laipan paksuus jousen jäykkyyden arvo voidaan laskea kaavalla [7, s.24]:

$$K = \frac{E}{4(1-\nu^2)} \frac{1}{\left[ \frac{b_1^2 h_w}{t_w^3} + \frac{b_1^3}{t^3} \right]} \quad (11)$$

Jossa  $t_{red} = t_w$ .

## 5.2 Tuulikuorman laskenta

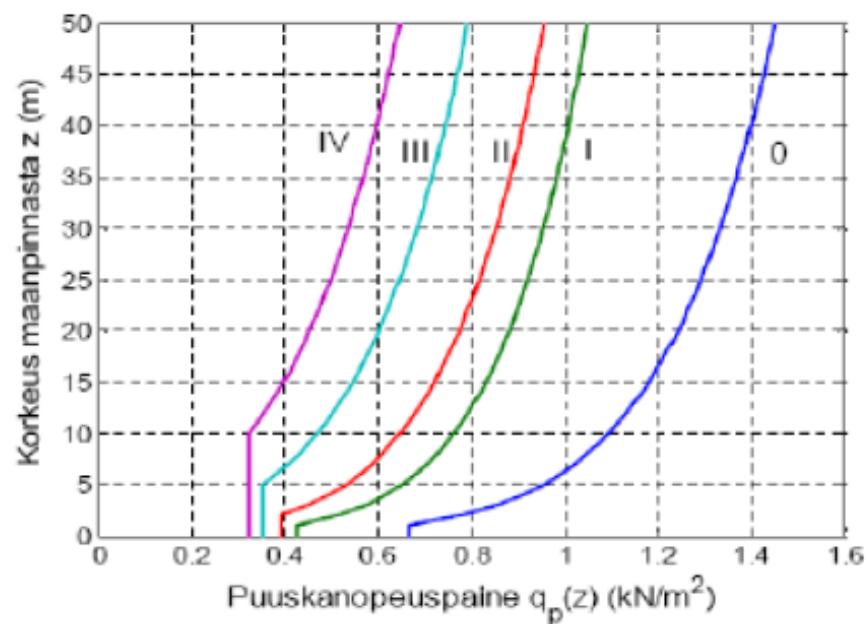
Tuulikuorman laskenta suoritetaan Eurokoodin SFS-EN 1991-1-4 ja RIL 201-1-2017 mukaan. Tuulikuorma lasketaan kymmenelle eri tapaukselle, tämä antaa mahdollisuuden rakennuksen sijoittamiseen erilaisille alueille sekä rakennuksen mittojen muutoksiin.

Rakennukselle asetettiin mitoituksen alussa tavoite korkeudeksi 10 metriä. Rakennuksen muista mitoista ei ole päätetty, mutta lähtökohtana on, että mitoitus toteutetaan matalalle rakennukselle, eli rakennuksen korkeus on pienempi tai yhtä suuri kuin rakennuksen leveys. [31, s.141.]

Rakennuksen sijoituspaikan läheisyydessä olevan maaston oletetaan olevan tasainen, eli rakennusta ei ole sijoitettu mäkeen tai sen läheisyydessä ei ole rinnettä. Tästä määräytyy Eurokoodin SFS-EN 1991-1-4 mukainen rakennuspaikan sijainnista määräytyvä pinnanmuotokerroin  $c_0$ . Pinnanmuotokertoimen arvona käytetään arvoa 1.0. [28, s.38.]

Tässä tutkimuksessa tuulikuorma määritetään tuulen puuskanopeuspaineen ja kokonaistuulivoiman avulla. Tämän menetelmän käyttöön on päädytty, koska rakennuksen tarkkoja dimensioita ei ole tiedossa ja todetaan, että tässä tutkimuksessa tällä menetelmällä päästään riittävään tarkkuuteen tuulikuormissa. Merkittävä tekijä tuulikuormaa määritettäessä tällä menetelmällä on rakennuksen sijoituspaikasta määräytyvä maastoluokka. Lisäksi merkittäviä muuttujia ovat maastoluokasta ja rakennuksen mitoista aiheutuva tuulen nopeuspaine ( $q_{p0}(z)$ ) sekä pelkästään mitoista määrittyvä tuulen voimakkeroin ( $c_f$ ). Kuvassa 16 esitetään puuskanopeuspaineen määrittäminen graafisesti ja kuvassa 17 maastoluokkien kuvaukset.

Mitoituksessa tarkastellaan kaikkia maastoluokkia, joita on viisi erilaista. Maastoluokat on numeroitu 0, 1, 2, 3 ja 4 niiden vaativuuden mukaan. Mitä pienempi maastoluokka on kyseessä, sitä suurempi kuorma katsotaan aiheutuvan rakennukselle. Maastoluokan vaikutus tuulikuorman määräytymiseen on suuri. Maastoluokkia kuvataan usein roomalaisilla numeroilla, kuten kuvassa 16.



Kuva 16. Puuskanopeuspaineen määrittäminen graafisesti. Kuten kuvaaja esittää, roomalaisilla numeroilla merkityillä (0-IV) maastoluokilla on suuri merkitys puuskanopeuspaineeseen. Pystyakselilta valitaan rakennuksen korkeus maanpinnasta ja vaakakselilta luetaan puuskanopeuspaine. [33.]





Kuva 17. Maastoluokkien kuvaukset on esitetty tekstillä, jota tukee havainnollistavat kuvat maastoluokista. Maastoluokan valintaan on mahdollista vaikuttaa myös ilmastotieteellisillä tutkimustiedoilla alueen tuulenvoimakkuuksista. [32.]

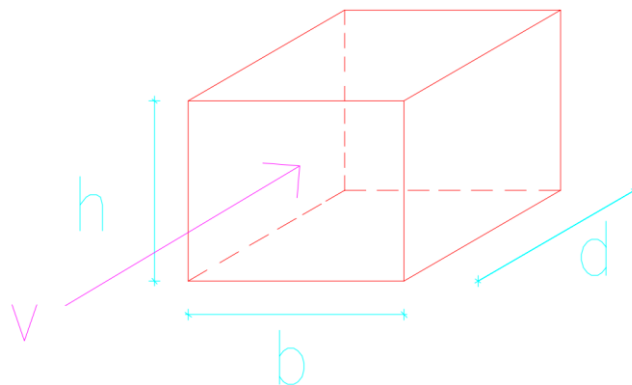
Mitoitustilanteessa, jossa rakennuksen dimensiot ovat tiedossa, voidaan rakennukselle aiheutuvaa tuulikuormaa tarkastella tarkemmin painekertoimilla. Rakennukseen kohdistuva tuuli voi aiheuttaa myös imua niille rakennuksen julkisivun seinille, jotka eivät ole tuulen suunnalle vastakkaisia. Tämä voi aiheuttaa tarkasteltavan lämpörankaorren yleisessä tilanteessa puristettuun laippaan vetojännityksen ja vastaavasti yleisessä tilanteessa vedettyyn laippaan puristusjännityksen. Tämänkaltaisen tilanne tulee tarkastella erikseen. Tämä tutkimus hyödyntää yksinkertaistettua menetelmää tuulikuorman määrittämisessä, jonka lähtökohtana on edellä selvitetyn mukaisesti puuskanopeuspaine. [31, s.143-163.]

### 5.2.1 Tuulen voimakertoimen määrittäminen

Rakennuksen mitoista aiheutuvan voimakertoimen  $c_f$  arvoksi määriteltiin 1.0 tai 1.55 RIL 201-1-2017 kirjan mukaisella menetelmällä. Voimakerroin vaikuttaa suoraan kuormaa kasvattavana kertoimena kokonaistuulivoimaa laskettaessa. [31, s.121-142.] Tutkimuksessa tuulikuorma on määritetty kaikissa viidessä maastoluokassa, kahdella eri tuulen voimakertoimella.

Tuulen voimakertoimiksi valikoituivat arvot 1.0 ja 1.55. Näihin arvoihin päädyttiin tarkastelemalla rakennuksen mahdollisia mittoja niin, että osa mitoista oli päätetty. Korkeus oli päätetty olevan 10 metriä. Rakennuksen todettiin myös olevan matala, eli korkeus on pienempi tai yhtä suuri kuin rakennuksen leveys. Kertoimilla haluttiin myös varmuutta mitoitukselle, tästä syystä laskennassa käytettiin myös korkeaa arvoa 1.55. 1.55 on hie- man korkeampi kuin vaativimmassa tilanteessakaan taulukon mukainen arvo, näillä reu- naehdoilla. Tämä arvo on 1.495.

Kuva 18 esittää rakennuksen mittoja, sekä tuulen suuntaa RIL-201-1-2017 esittämää tuulen voimakerrointa määrittettäessä. Taulukossa 4 esitetään esimerkkejä tuulen voimakertoimen määrittämisestä, RIL-201-1-2017:n taulukon 3 mukaan. [31, s.141.]



Kuva 18. Tuulen voimakertoimen määrittämisessä käytettävät rakennuksen mitat. Vektori  $v$  kuvaa pintaan kohdistuvan tuulen suuntaa.

Taulukko 3. RIL-201-1-2017 mukainen taulukko tuulen voimakertoimen  $c_f$  määrittämisestä. [31, s.141]

	Sivusuhte $d / b$								
$\lambda$	0.1	0.2	0.5	0.7	1	2	5	10	50
$\leq 1$	1.2	1.2	1.37	1.44	1.28	0.99	0.60	0.54	0.54
3	1.29	1.29	1.48	1.55	1.38	1.07	0.65	0.58	0.58
10	1.40	1.40	1.60	1.68	1.49	1.15	0.70	0.63	0.63

Taulukko 4. Esimerkkejä tuulen voimakertoimen  $C_f$  määrittämisestä.

Mitta h m	Mitta b m	Mitta d m	Tehollinen hoikkuus $\lambda = 2h / b$ (kun $h < 15m$ )	Sivusuhte $d / b$	Voimakerroin $C_f$
10	20	60	1	3	0.86
10	20	40	1	2	0.99
10	12	24	1.67	2	1.02
10	10	7	2	0.7	1.495

### 5.2.2 Kokonaistuulivoiman määrittäminen

Kokonaistuulivoima lasketaan RIL-201-1-2017 mukaan. Matalalle rakennukselle, eli rakennukselle jonka korkeus on pienempi kuin leveys, kokonaistuulivoima lasketaan kaavan 12 mukaan. Kokonaistuulivoimaa määrittäessä rakennekertoimen  $c_s c_d$  käytetään arvoa 1.0, koska oletettavasti rakennus täyttää tämän arvon käyttöön vaadittavat vaatimukset, jotka esitetään tarkemmin edellä mainitussa julkaisussa.

$$F_w = c_s c_d c_f q_p(h) A_{ref} \quad (12)$$

$c_s c_d$  on rakennekerroin

$c_f$  on voimakerroin

$q_p(z)$  on maastonpinnan muodon mukaan modifioitu nopeuspaine

$A_{ref}$  on tuulikuorman vaikutusala [31, s.140-145]

Kokonaistuulivoimasta saadaan rakennuksen pinnalle kohdistuva tuulikuorma. Tätä tuulikuormaa käytetään tässä tutkimuksessa yksittäiselle lämpörankaprofiilille aiheutuvan

kuorman laskentaan. Todetaan, että tässä tutkimuksessa näin laskettaessa saavutetaan riittävä tarkkuus tuulikuormalle.

### 5.3 Mitoitus

Lämpörankaprofiilin mitoitus tehdään eurokoodin mukaisesti. Mitoituksessa sovellettavia eurokoodeja ovat:

- SFS-EN 1990: Eurokoodi. Rakenteiden suunnitteluperusteet
- SFS-EN 1991-1-4: Eurokoodi 1: Rakenteiden kuormat. Yleiset kuormat. Tuulikuormat
- SFS-EN 1993-1-3: Eurokoodi 3: Teräsrakenteiden suunnittelu. Osat 1-3. Yleiset säännöt. Lisäsäännöt kylmämuovatuille sauvoille ja levyille
- SFS-EN 1993-1-5: Eurokoodi 3: Teräsrakenteiden suunnittelu. Osat 1-5: Tasomaiset levyrakenteet

Eurokoodien lisäksi mitoituksessa käytetään Suomen Rakennusinsinöörien liiton RIL ry:n julkaisemaa kirjaa RIL 201-1-2017 Suunnitteluperusteet ja rakenteiden kuormat.

Ainoa tarkasteltavaan seinärakenteeseen vaikuttava vaakasuuntainen kuorma on tuulikuorma, joka on muuttuva kuorma. Tutkimuksen käsittelemä lämpörankaprofiili on rakenteessa vastaanottamassa tätä kuormaa ja siirtämässä sitä muille rakenteille. Tämän johdosta tarkasteltavat ilmiöt murtorajatilassa ovat taivutuskestävyyden- ja leikkauslomahduskestävyyden tarkistaminen. Käyttörajatilassa tarkastetaan taipuma. Nämä ilmiöt muodostuvat kyseisessä rakenteessa profiilin mitoituksen kannalta kriittisiksi ilmiöiksi stabiiliteetin menetyksen tai käyttörajan vaatimusten vuoksi.

Seuraavissa alaotsikoissa käsitellään mitoituksen yksittäiset vaiheet. Mitoitus aloitetaan määrittämällä rakenteelle tuulikuorma ja tämän jälkeen kuormasta aiheutuvat voimasuureet. Kun voimasuureet ovat tiedossa, tehdään rakenteelle murtorajatilan tarkastelu ja tämän jälkeen käyttörajan tarkastelu. Rakennetta käsitellään yksiaukkoisena vapaasti tuettuna palkkina, tällöin palkin jännevälin keskikohtaan aiheutuu taivutusmomentin maksimi.

### 5.3.1 Voimasuureet ja kuormayhdistelmät

Rakenteen ainoana mitoituskuormana huomioitava kuorma on tuulikuorma, joka on muuttuva kuorma. Kun tuulikuorman suuruus kilonewtoneina neliömetrille ( $\text{kN/m}^2$ ) on määritetty, voidaan laskea yhdelle lämpörankaorrelle tästä aiheutuva kuorma. Näin meneteltäessä saadaan tulokseksi määräävä muuttuva tasaisesti jakautunut kuorma  $Q_k$ . Mitoituskuorma saadaan kuormayhdistelmällä.

Murtorajatilassa määräävä kuormayhdistelmä, jolla aiheutuu suurin kuorma, saadaan eurokoodin kaavalla, joka on tässä tutkimuksessa kaava numero 13. Kaava 13 on yleisessä muodossa ja kaavaa voidaan tässä yhteydessä soveltaa kaavan 14 mukaisesti:

$$E_d = \gamma_{Sd} E \{ \gamma_{G,j} G_{k,j}; \gamma_P P; \gamma_{Q,1} Q_{k,1}; \gamma_{Q,i} \psi_{0,i} Q_{k,i} \} \quad j \geq 1; i > 1 \quad (13)$$

$$Q_d = \gamma_{Q1} \cdot Q_k \cdot K_{FI} \quad (14)$$

$K_{FI}$  = Kuormakerroin

$\gamma_{G1}$  = Varmuuskerroin

Käyttörajatilassa kuormayhdistelmässä käytetään kertoimia, joiden suuruus on 1.0. Eurokoodin yleistä kaavaa voidaan soveltaa kaavan 15 esittämällä tavalla:

$$Q_{sls} = \gamma_{Q,sls} \cdot Q_k \cdot \psi_{1.1} \quad (15)$$

$\gamma_{G,sls}$  = Varmuuskerroin

$\psi_{1.1}$  = Kerroin (pääasialliset kuormitukset)

[34, s.80]

### 5.3.2 Taivutuskestävyyden laskenta

Taivutuskestävyyden tarkastelussa orren taivutuskestävyyden mitoitusarvoa verrataan mitoittavan taivutusmomentin maksimiarvoon. Orren taivutuskestävyys tulee olla suurempi kuin orressa vaikuttava maksimimomentti.

Orren taivutuskestävyyden mitoitusarvo lasketaan käyttämällä poikkileikkauksen tehollisia arvoja. Kaava 16 esittää menetelmän taivutuskestävyyden mitoitusarvon laskentaan.

$$M_{y,Rd} = f_{yb} \cdot \frac{W_{y,eff}}{\gamma_{M0}} \quad (16)$$

$\gamma_{M0}$  = Osavarmuusluku teräkselle

Mitoittava taivutusmomentti lasketaan mekaniikan kaavojen mukaan, käyttäen MRT-kuormayhdistelmien kuormia. Vapaasti tuetulle yksiaukkoiselle palkille tasan jakaantuneen kuorman aiheuttama maksimimomentti lasketaan kaavan 17 mukaan seuraavasti:

$$M_{max} = \frac{1}{8} \cdot p \cdot L^2 \quad (17)$$

### 5.3.3 Leikkauslommahduskestävyyden laskenta

Leikkauslommahduskestävyys lasketaan Eurokoodin 3 mukaan. Tämä laskenta huomioi kuvan 11 kohdan a-mukaisen stabiiliuden menetys ilmiön, eli paikallisen lommahduksen. Laskennassa määritetään leikkauslommahduskestävyys, jota verrataan orressa vaikuttavaan leikkausvoiman maksimiarvoon. Leikkauslommahduskestävyyden tulee olla suurempi, kuin orressa vaikuttavan leikkausvoiman maksimiarvon.

Leikkauslommahduskestävyyttä laskettaessa huomioidaan uuman mahdolliset jäykisteet. Tämän tutkimuksen profiileissa ei ole jäykisteellistä uumaa.

### 5.3.4 Taipuman tarkistaminen

Taipuman laskennassa lasketaan kuorman aiheuttama maksimitaipuma, jota verrataan Suomen kansallisen liitteen mukaiseen taipuman raja-arvoon. Maksimitaipuman tulee olla pienempi kuin taipuman raja-arvon. Taipuman laskenta on käyttörajatila tarkastelu, tästä syystä mitoituksessa käytetään KRT-kuormayhdistelmiä.

Taipuman raja-arvo määritetään ympäristöministeriön asetuksessa eurokoodi-standardien soveltamisesta talonrakentamisessa (2007). Tämä julkaisu, eli Suomen kansallinen

liite, määrittää Suomessa taipuman tai siirtymän raja-arvoksi seinäorsille  $L/150$ , jossa  $L$  on jänneväli. [35, s.5.]

Maksimitaipuma orrelle lasketaan mekaniikan kaavoilla. Tasan jakautuneen kuorman aiheuttama maksimitaipuma vapaasti tuetulle yksiaukkoiselle palkille lasketaan kaavan 18 mukaan.

$$v_{\max} = \frac{5}{384} \cdot \frac{p \cdot L^4}{E \cdot I} \quad (18)$$

$p$  = Kuorman intensiteetti

$L$  = Jänneväli [29, s.1]

#### 5.4 Jännevälän tarkastelu

Mitoituksen tavoitteena oli tarkastella, onko orren kapasiteetti riittävä suunnitellulle jännevälille. Saavutettua tulokset mitoituksessa, voitiin samoja laskentatiedostoja hyödyntää myös kunkin profiilin maksimijännevälän määrittämiseen. Maksimijännevälit laskettiin useissa eri tuulikuormitustilanteissa ja tulokset taulukoitiin tilaajan käyttöön.

Jänneväliä tarkastellessa huomioidaan myös kahden yksittäisen orren liitos. Liitoksessa orret asennetaan päällekkäin tietyltä matkalta, tätä matkaa ei huomioida vapaaseen jänneväliin.

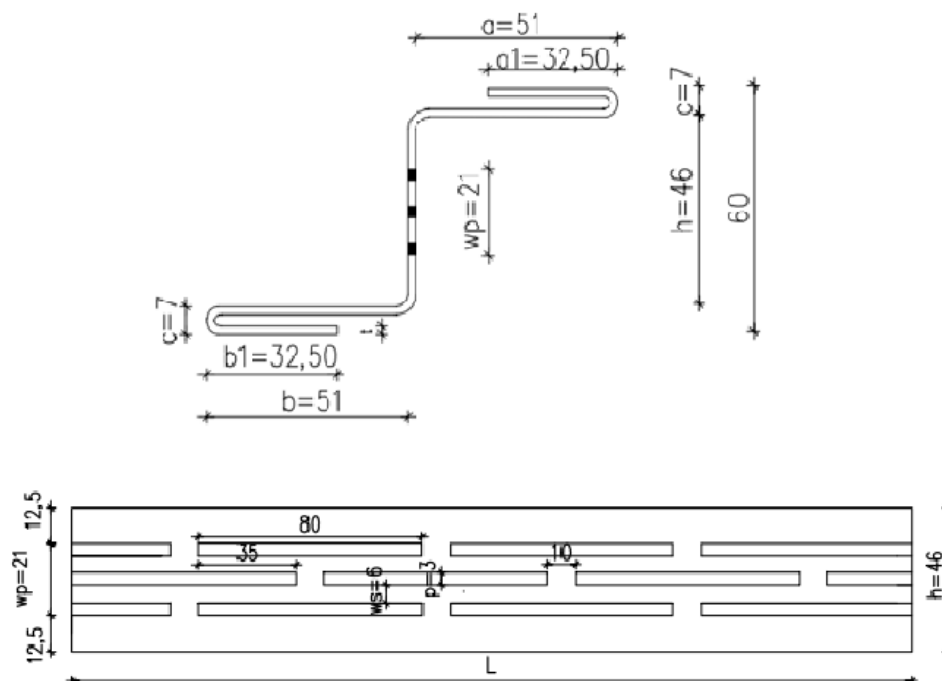
## 6 Laskennan tulokset

Tässä luvussa esitellään kootusti laskennalla saavutetut tulokset. Laskenta käsittää kolme pääosuutta, jotka ovat tehollisten poikkileikkaussuureiden laskenta, mitoitus ja jännevälin tarkastelu. Laskenta on suoritettu kuvan 19 mukaiselle profiilille.

Laskennan tuloksien tulkitsemista helpottaa käyttöasteen esittäminen. Käyttöaste lasketaan jakamalla mitoittava voima kestävyydellä, tai jakamalla maksimitaipuma suurimmalla sallitulla taipumalla. Näin laskettaessa käyttöasteen tulee olla 1.0 tai sen alle, jotta kestävyys on riittävä.

### 6.1 Teholliset poikkileikkausarvot

Teholliset poikkileikkausarvot on laskettu kuvan 19 mitoilla olevalle lämpörankapoikkileikkaukselle kolmella eri ainepaksuudella. Teholliset poikkileikkausarvot on koottu taulukkoon 5. Tehollisten poikkileikkausarvojen laskennasta on esimerkkilaskenta ainepaksuudelle 2 mm raportin liitteenä numero 1.



Kuva 19. Ylempässä kuvassa Z60-Profiilin poikkileikkauksen mitat ja alemmassa kuvassa uuman rei'itys. Uumassa on kolme riviä termoreikiä.

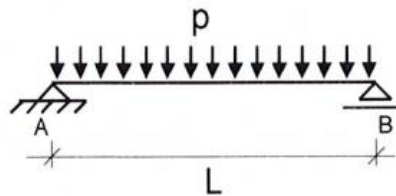


Taulukko 5. Tutkimuksessa lasketut, kuvan 19 mukaisen poikkileikkauksen teholliset poikkileikkausarvot kootusti.

Ainepaksuus mm	t	1	1.5	2
Brutto poikkipinta-ala mm <sup>2</sup>	$A_{br}$	190.9	287.2	381.3
Tehollinen poikkipinta-ala mm <sup>2</sup>	$A_{eff.tot}$	166.2	259.8	352.8
Tehollinen jäyhyysmomentti $\times 10^5 \text{mm}^4$	$I_{y,eff}$	0.8917	1.4058	2.0087
Tehollinen taivutusvastus $\times 10^3 \text{mm}^3$	$W_{y,eff}$	3.0218	4.5842	6.7072
Taivutuskapasiteetti kNm	$M_{y,Rd}$	1.058	1.6045	2.348

## 6.2 Mitoituksen tulokset

Mitoitus toteutettiin vapaasti tuetulle yksiaukkoiselle orrelle, jonka jänneväli on 2700 mm. Orren poikkileikkaus on kuvan 19 mukainen ja sen ainepaksuus on 1 mm, 1.5 mm tai 2 mm. Kuorma on tasan jakautunut kuorma joka vaikuttaa palkin koko pituudella. Kuvassa 20 esitetään tarkasteltavan orren rakennemalli.



Kuva 20. Ortta tarkastellaan yksiaukkoisena ja vapaasti tuettuna. Koko orren matkalla vaikuttaa tuulen aiheuttama tasan jakautunut kuorma. [36.]

Rakennuksen tarkkaa sijaintia ei ole määritetty mitoituksen lähtötietona, tästä syystä mitoitus toteutettiin kaikissa maastoluokissa. Lisää variaatiota saavutettiin muokkaamalla tuulen voimakertoimena käytettiin arvoja 1.0 ja 1.55.

Mitoituksen tulokset on taulukoitu ja esitetty tässä kappaleessa. Esimerkkilaskelma mitoituksesta on tämän kirjallisen raportin liitteenä numero 2. Ennen mitoituksen tuloksia, esitetään perustiedot mitoitukseen taulukossa 6 ja profiilien mekaanisten ominaisuuksien tiedot kootusti taulukossa 7. Tämän jälkeen taulukossa 8 esitetään mitoituksen tulokset eri tilanteissa.

Tässä kappaleessa esiteltävissä taulukossa 8, tulosten havainnollistamiseksi on käytetty värejä. Vihreä väri tarkoittaa, että tarkasteltava arvo on riittävä tai soveltuva. Vastaavasti punainen väri tarkoittaa, että tarkasteltava arvo ei ole riittävä tai soveltuva.

Ainepaksuus sarakkeen kohdalla vihreä väri tarkoittaa, että profiili kyseisellä ainepaksuudella soveltuu käytettäväksi rakenteessa. Vastaavasti punainen väri tarkoittaa, että profiili kyseisellä ainepaksuudella ei täytä kaikkia mitoituksessa asetettuja vaatimuksia ja näin ollen ei ole soveltuva käytettäväksi rakenteessa.

Taulukko 6. Lähtötiedot mitoitukselle.

#### Puuskanopeuspaine

Maastoluokka 0	1.09	kN/m <sup>2</sup>
Maastoluokka 1	0.76	kN/m <sup>2</sup>
Maastoluokka 2	0.65	kN/m <sup>2</sup>
Maastoluokka 3	0.47	kN/m <sup>2</sup>
Maastoluokka 4	0.32	kN/m <sup>2</sup>

#### Jänneväli

2700

mm

#### Taipuman raja-arvo

18

mm

#### Lähtötiedot

Luotettavuusluokka	RC2	Vuotta
Seuraamusluokka	CC2	
Suunniteltu käyttöikä	50	
Materiaali	S350	
Kimmokerroin	210	

Gpa

Taulukko 7. Profiilien tehollisten poikkileikkausten mekaaniset ominaisuudet.

Ainepaksuus mm	I.y Tehollinen jäyhyysmomentti x10 <sup>5</sup> mm <sup>4</sup>	W.y Tehollinen taivutusvastus x10 <sup>3</sup> mm <sup>3</sup>
1.0	0.89176	3.0218
1.5	1.4058	4.5842
2.0	2.0087	6.7072

	Taivutuskestävyyden mitoitusarvo M.y.Rd [kNm]	Leikkauskestävyyden mitoitusarvo V.b.Rd [kN]
1.0	1.058	4.959
1.5	1.6045	8.794
2.0	2.348	11.79

Seuraavassa taulukoissa 8 esitetään mitoituksen tulokset taulukoiden 6 ja 7 mukaisilla arvoilla laskettuna. Kyseessä Z60-lämpörankaprofiili, jonka ainepaksuus on 1 mm, 1.5 mm tai 2 mm.

Taulukko 8. Z-60-lämpörankaprofiilin mitoituksen tulokset taulukoituina.

Maastoluokka	Tuulen voimakkeroin Cf	Taivutusmomentti MEd kNm	Leikkausvoima Ved kN	Ainepaksuus mm	Taivutusmomentin käyttöaste	Leikkausvoiman käyttöaste	Taipuma mm / käyttöaste
0	1	0.894	1.324	1.0	0.845	0.267	24.166 / 1.343
0	1	0.894	1.324	1.5	0.557	0.151	15.33 / 0.852
0	1	0.894	1.324	2.0	0.381	0.112	10.728 / 0.596
0	1.55	1.386	2.053	1.0	1.31	0.414	37.457 / 2.081
0	1.55	1.386	2.053	1.5	0.864	0.233	23.761 / 1.32
0	1.55	1.386	2.053	2.0	0.59	0.174	16.629 / 0.924
1	1.0	0.623	0.923	1.0	0.589	0.186	16.85 / 0.936
1	1.0	0.623	0.923	1.5	0.388	0.105	10.688 / 0.594
1	1.0	0.623	0.923	2.0	0.265	0.078	7.48 / 0.416
1	1.55	0.966	1.431	1.0	0.913	0.289	26.117 / 1.451
1	1.55	0.966	1.431	1.5	0.602	0.163	16.567 / 0.92
1	1.55	0.966	1.431	2.0	0.411	0.121	11.595 / 0.644
2	1.0	0.533	0.79	1.0	0.504	0.159	14.411 / 0.801
2	1.0	0.533	0.79	1.5	0.332	0.09	9.141 / 0.508
2	1.0	0.533	0.79	2.0	0.227	0.067	6.398 / 0.355
2	1.55	0.826	1.224	1.0	0.781	0.247	22.337 / 1.241
2	1.55	0.826	1.224	1.5	0.515	0.139	14.196 / 0.787
2	1.55	0.826	1.224	2.0	0.352	0.104	9.916 / 0.551
3	1.0	0.385	0.571	1.0	0.364	0.115	10.42 / 0.579
3	1.0	0.385	0.571	1.5	0.24	0.065	6.61 / 0.367
3	1.0	0.385	0.571	2.0	0.164	0.048	4.626 / 0.257
3	1.55	0.597	0.885	1.0	0.565	0.178	16.151 / 0.897
3	1.55	0.597	0.885	1.5	0.372	0.101	10.245 / 0.569
3	1.55	0.597	0.885	2.0	0.254	0.075	7.17 / 0.398
4	1.0	0.262	0.389	1.0	0.248	0.078	7.095 / 0.394
4	1.0	0.262	0.389	1.5	0.164	0.044	4.5 / 0.25
4	1.0	0.262	0.389	2.0	0.112	0.033	3.15 / 0.175
4	1.55	0.407	0.603	1.0	0.384	0.122	10.997 / 0.611
4	1.55	0.407	0.603	1.5	0.254	0.069	6.976 / 0.388
4	1.55	0.407	0.603	2.0	0.173	0.051	4.882 / 0.271

Taulukoiduista tuloksista voidaan havaita, että jo 2700 mm jänneväliä ohuemmillä ainepaksuuksilla on hankaluuksia saavuttaa riittävä kapasiteetti haastavissa tuuliolosuhteissa. Maastoluokan ollessa suotuisampi on helpompaa saavuttaa vaadittava kapasiteetti.

### 6.3 Jännevälän tarkastelun tulokset

Aiemmissa kappaleissa käsitelty mitoitus toteutettiin valitsemalla jänneväli tuotantoteknisesti sopivaksi. Työn tilaajan näkökulmasta on kuitenkin tarpeellista tarkastella myös profiililla saavutettavaa maksimijänneväliä.

Jännevälän tarkastelu on tehty yksiaukkoiselle vapaasti tuetulle orrelle. Z60-lämpöranka-profiilin poikkileikkaus on kuvan 19 mukainen. Taulukossa 9 esitetään maksimijänneväli ainepaksuuksilla 1 mm, 1.5 mm ja 2 mm, kaikissa maastoluokissa, tuulen voimakertoimen ollessa 1.0 tai 1.55. Taulukon mittatarkkuus on 50 mm. Esitetyt arvot ovat varman puolella.

Taulukon tulkintaa helpottaakseen on käytetty värejä. Vihreä väri osoittaa, että profiililla saavutetaan mitoituksessa tavoiteltu 2700 mm jänneväli. Vastaavasti punainen väri osoittaa, että profiililla ei päästä mitoituksessa tavoiteltuun 2700 mm jänneväliin.

Taulukko 9. Maksimijännevälit tutkimuksen käsittelemällä Z60-lämpörankaprofililla.

Maasto- luokka	Tuulen voi- makerroin Cf	Ainepak- suus mm	Maksimi jänneväli mm
0	1.0	1.0	2400
0	1.0	1.5	2800
0	1.0	2.0	3200
0	1.55	1.0	2100
0	1.55	1.5	2450
0	1.55	2.0	2750
1	1.0	1.0	2750
1	1.0	1.5	3200
1	1.0	2.0	3600
1	1.55	1.0	2350
1	1.55	1.5	2750
1	1.55	2.0	3100
2	1.0	1.0	2900
2	1.0	1.5	3350
2	1.0	2.0	3800
2	1.55	1.0	2500
2	1.55	1.5	2900
2	1.55	2.0	3250
3	1.0	1.0	3200
3	1.0	1.5	3750
3	1.0	2.0	4200
3	1.55	1.0	2750
3	1.55	1.5	3250
3	1.55	2.0	3650
4	1.0	1.0	3650
4	1.0	1.5	4250
4	1.0	2.0	4800
4	1.55	1.0	3150
4	1.55	1.5	3700
4	1.55	2.0	4150

## 7 FEM-laskentaosuus

FEM-laskentaosuus suoritettiin Finnfoamin tiloissa Salossa 26.1.2018. FEM-laskennalla oli tarkoitus varmentaa käsinlaskettuja tuloksia ja tarkastella rakenteen toimintaa kuormitustilanteessa.

FEM-laskentaan käytettiin CadWorks Oy:n kehittämää ohjelmaa SolidWorks Simulation. Laskentaan käytetyn mallin oli luonut Finnfoam Oy:n mekaniikkasuunnittelija.

FEM-laskennassa oli käytössä lineaarinen analyysi, joka soveltuu rakenteiden mitoituksen tarkasteluun. Lineaarinen analyysi tekee laskennassa kuitenkin useita yksinkertaisuuksia verrattuna epälineaariseen analyysiin. Lineaarisen analyysin katsottiin kuitenkin olevan tässä vaiheessa riittävän tarkka menettely. [37.]

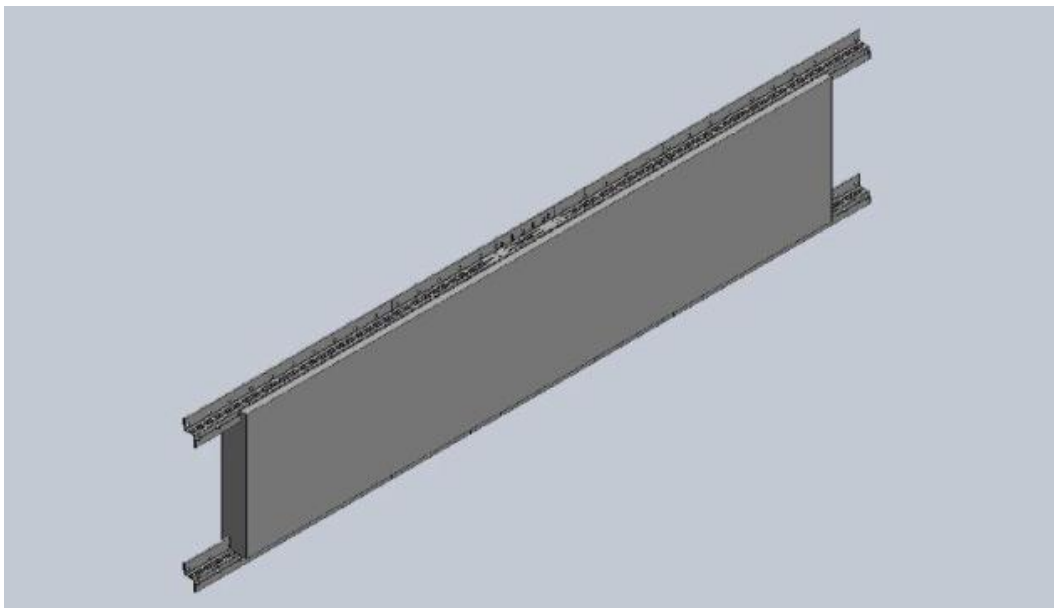
Rakenteelle tullaan tekemään myöhempänä ajankohtana myös todellinen koekuormitus. Ennen koekuormitusta oli kuitenkin perusteltua tarkastella rakennetta tietokonelaskennan avulla.

### 7.1 FEM-laskennan rakennemalli

FEM-laskentaosuudessa tarkasteltiin kahta eri ainepaksuutta mitoitettua Z60-lämpörankaprofiilista. Tarkasteluun valikoituivat profiilit ainepaksuuksilla 1.5 mm ja 2.0 mm.

FEM-laskennassa rakenteille toteutettiin kaksi laskentaa toisistaan eroavissa tapauksissa. Ensimmäisenä tarkasteluna rakenteelle asetettiin kuormat, jotka aiheuttivat sen käsinlaskettua momenttikestävyyttä vastaavan momentin. Toisessa tarkastelussa rakenteelle asetettiin kuormat, jotka aiheuttivat yhtä suuren taivutusmomentin kuin rakenteelle määritelly tuulikuorma valitussa tuuliolosuhteessa.

FEM-laskentaan mallinnettu rakenne koostui kahdesta Z60-lämpörankaprofiilista ja niiden väliin jäävästä 600 mm leveästä PIR-eristeestä. PIR-eristeen paksuus oli 120 mm. Kuvassa 21 esitetään FEM-laskennan mukainen rakenne. Rakenne oli sivuttaissiirtymältään tuettu, ja profiilien kiepahdus estetty. Jokainen yksittäinen pistekuorma vaikutti orren uumaan leveydellä 80 mm.



Kuva 21. FEM-laskentaan mallinnettu rakenne. Rakenteessa on kaksi Z60-lämpörankaprofiilia ja niiden välissä PIR-eriste.

## 7.2 Menetelmät FEM-laskennan tulosten käsittelyyn

FEM-laskennassa pyrittiin rakenteeseen kohdistamaan kuorma, joka vastaa käsinlaskennassa käytetyn tasan jakautuneen kuorman tapausta. Varsinaisessa kuormituskokeessa tasan jakautuneen kuorman kohdistaminen rakenteelle, on kuitenkin erittäin vaikea toteuttaa. Tästä syystä menetellään toisin ja käytetään pistekuormia rakenteella. Lisäämällä yksittäisten kuormitusta kohdistavien pistekuormien määrää voidaan päästä lähemmäs tasaisesti jakautuneen kuorman tilannetta. Tästä syystä myös FEM-laskennassa tehtiin tarkasteluja useilla eli kuorma malleilla. Kuvassa 22 esitetään eri kuormitustilanteiden aiheuttamat momentti- ja leikkausvoimapinnat.

Rakennetta tarkasteltiin FEM-laskennassa tasan jakautuneen kuorman tapauksessa samoin kuten käsinlaskennassa. Lisäksi tarkastellaan nelipistekuormituskoe ja kuusipistekuormituskoe. Nelipistekuormituskokeessa rakenteeseen kohdistetaan kaksi pistekuormaa ja kaksi tukireaktiota. Vastaavasti kuusipistekuormituskokeessa rakenteeseen kohdistuu neljä pistekuormaa ja kaksi tukireaktiota. Nämä kuormitustilanteet on esitetty kuvassa 22.

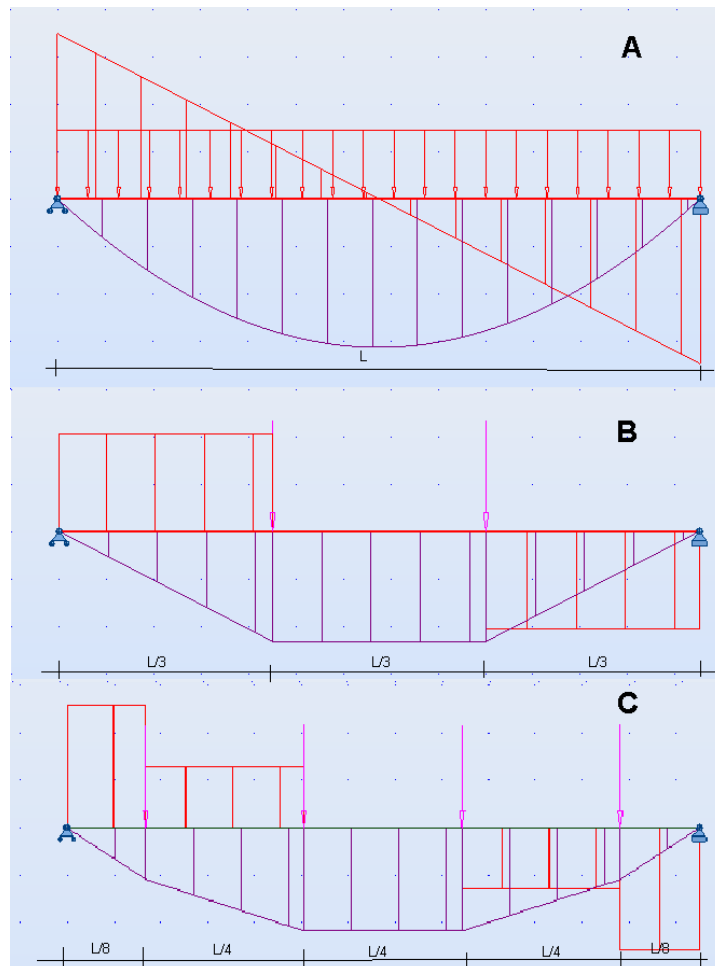
FEM-laskennassa kuvan 22 mukaisille tapauksille A ja C momentin maksimiarvo saadaan kaavalla 19. Tapaukselle B maksimimomentin laskentaan käytetään kaavaa 20. Näitä mekaniikan kaavoja voidaan soveltaa kuormituskokeen kuormien määrittämiseen.

$$M_{\max} = \frac{q \cdot L^2}{8} \quad (19)$$

$$M_{\max} = \frac{F \cdot L}{3} = \frac{q \cdot L^2}{6} \quad (20)$$

$q$  on tasan jakautunut kuorma [kN/m]

$F$  on pistekuorma [kN]



Kuva 22. Kuvassa kuormat kuvataan nuolilla ja niiden aiheuttamia momenttipintoja lilalla värillä. Punainen väri kuvaa aiheutuvaa leikkausvoimapintaa. Kirjain  $L$  on jänneväli. A) tasan jakautunut kuorma, B) kaksi pistekuormaa, C) neljä pistekuormaa.



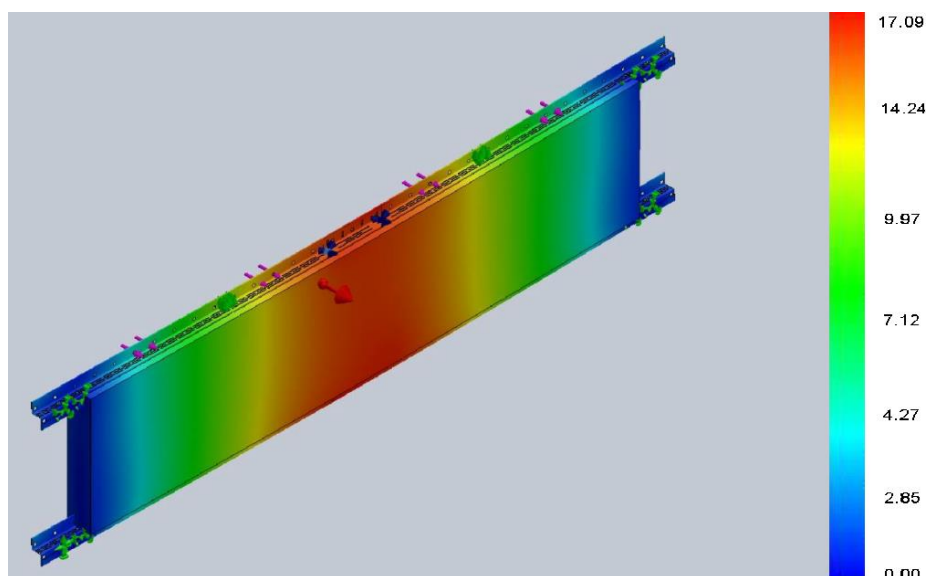
### 7.3 FEM-laskennan tulokset ja niiden vertaaminen käsinlaskentaan

FEM-laskennan merkittävimpana tuloksena voidaan mainita 1.5 mm ainepaksuuden omaavan Z60-lämpörankaprofiin tarkastelusta saadut tulokset tuulikuormaa simuloivassa tilanteessa.

Tarkasteltavaksi valikoitui tässä jänneväliltään 2700 mm pitkä rakenne, johon kohdistettiin maastoluokassa 0, tuulen voimakertoimella 1.0 vaikuttava kuorma. FEM-laskennassa rakenteelle asetettiin kuusipistetaivutuskokeen mukaiset kuormat, jotka aiheuttivat rakenteeseen vastaavan maksimimomentin, jonka tuulikuorma aiheuttaa. Kuvassa 23 esitetään tämän laskennan taipumat rakenteessa.

Tuloksena FEM-laskennasta saatiin rakenteen maksimitaipumaksi 17.09 mm. Vastavassa tarkastelussa käsinlaskennalla määritetty arvo oli 15.35 mm. Sallitun taipuman raja-arvon ollessa ympäristöministeriön hyväksymän kansallisen liitteen mukaan 18 mm. [35, s.5]

Ottaen huomioon FEM-mallin pienehköt poikkeamat sekä sen, että mallissa rakenteen keskikohdassa oli liitos. Voidaan todeta, että FEM-laskenta korreloi hyvin käsinlaskentaa ja näin ollen tavoiteltu tulos käsinlaskennan varmistamiseksi saavutettiin.



Kuva 23. Kuvan rakenteessa on kaksi Z60-lämpörankaprofiilia, joiden ainepaksuus on 1.5 mm. Profiilien välissä on 600 mm PIR-eristettä. Värit kuvaavat FEM-laskennan mukaista rakenteen taipumaa millimetreinä, kun rakenteeseen on kohdistettu kuusipistetaivutuskokeen mukaisesti tuulikuorma, jonka suuruus on 1.09 kN/m<sup>2</sup>.

Myös muiden suoritettujen FEM-laskelmien perusteella voidaan todeta, että käsinlaskenta korreloi hyvin FEM-laskentaa. FEM-laskennan tulkinnessa hyödynnettiin aiempien laskelmien pohjalta tietoa esimerkiksi liitoksen ja tuennan vaikutuksesta rakenteeseen.

FEM-laskennassa tuloksiin eroa käsinlaskentaan verrattaessa tuo myös hieman liitтоваikutus. Käsinlaskennassa eristeen vaikutusta ei huomioitu, toisin kuin FEM-laskennassa. Liitтоваikutuksen merkitys tässä rakenteessa on aiemman tutkimuksen perusteella kuitenkin hyvin vähän kapasiteettia lisäävä. Suurempaa eroa tuloksien välillä aiheutti kuormien ja tuennan sijaintien pienehkö eroavaisuus. Käsinlaskennassa tukien ja kuormien sijainti on absoluuttinen, FEM-laskennassa tehtiin muutamien senttimetrien yksinkertaisuuksia, jotta kiinnityksen toteuttaminen mallissa helpottui. Todettiin, että näin menetelmällä päästään riittävään tarkkuuteen käsinlaskennan varmistamiseksi.

## 8 Yhteenveto

Tässä insinööriyössä tarkasteltiin uumarei'itetyn teräsrangan mekaanista kestävyyttä. Työssä mitoitettiin lämpörankaprofiili seinärakenteeseen sekundäärikannattimeksi. Työ rakentui tuotekehityshankkeen ympärille, jossa tavoitteena oli kehittää aiemmin markkinoilla olleesta eriste-elementti seinäjärjestelmästä paksuudeltaan ohuempi rakenne. Ohuempaan rakenteeseen tuli suunnitella ja mitoittaa aikaisempaa pienempi lämpörankaprofiili.

Insinööriyön lähtökohtana oli tilaajayrityksen toiveiden, tuotantoteknisten seikkojen ja aiemman tutkimuksen perusteella valikoitunut Z-poikkileikkaus. Z-lämpörankaprofiili asennetaan seinärakenteeseen vaakasuuntaan vastaanottamaan ja siirtämään tuulikuormia pystysuuntaisille primaarikannattimille.

Insinööriyön sisältö oli laajalti asiaa, joka ei kuulu ammattikorkeakoulun opetussisältöön. Etenkin tutkimuksen laskentaosuus sisältää osuuksia, joiden suorittaminen on vaatinut laajaa perehtymistä ja itseopiskelua. Lisäksi haastetta laskentaan on tuonut laskennan ajoittumisen opintojen kannalta niin, että teräsrakenteiden jatkokurssi ajoittuu vasta laskennan jälkeiselle ajalle. Tällä jatkokurssilla tullaan käsittelemään esimerkiksi ensimmäistä kertaa poikkileikkausluokan 4 mitoitusta, johon tämä insinööriyö syvenyy. Onnistuneen insinööriyön taustalla on merkittävänä tekijänä erinomainen ohjaus.

Tutkimus koostui laskennallisesta osuudesta, kirjallisesta osuudesta ja FEM-laskenta osuudesta. Laskennallinen osuus oli merkittävin osuus työtä ja sisälsi työn liitteenä yksittäisessä tapauksessa esiteltävän tehollisten poikkileikkaussuureiden laskennan, mitoituksen ja jännevälintarkastelun. Näissä osuuksissa rakenteelle toteutettiin yhteensä yli 60 toisistaan eroavaa laskelmaa.

Tutkimuksessa hyödynnettiin työn alkuvaiheessa työtä ohjanneen Kalle Sinisalon laatimaa diplomityötä: Uumareititety teräsranka alapohjan kantavana rakenteena pientalossa (2017). Tämän lisäksi myös toisen insinöörityön ohjaajan Markku Laineen diplomityö: Avoprofiilisten kylmämuovattujen teräsohutlevyorsien mitoitus tutkimus (1993), oli merkittävä lähde työlle. Sinisalon ja Laineen työt ohjeistivat erityisesti Eurokoodin 3:n osan 3: Teräsrakenteiden suunnittelun soveltamisessa kylmämuovatuille uumareitetyille teräsraangoille. Tästä merkittävänä esimerkkinä voidaan mainita tehollisten poikkileikkausarvojen laskentaan tarvittavan reunajäykisteen jousen jäykkyyden  $K$  määrittäminen. Tämä määrittäminen on esitelty tarkemmin työn kappaleessa 5.1.3. Reunakäänteellisen Z-profiilin ekvivalentin systeemin kiertymäjousen määrittäminen.

Tämän insinöörityön yhtenä merkittävänä piirteenä eurokoodin soveltamisen lisäksi oli uuman termoreiitys ja tämän reiityksen huomioiminen laskennassa. Uuman reiitys heikentää profiilin kapasiteettia, mutta parantaa lämpötekniisiä ominaisuuksia tavoiteltaessa kylmäsilloilta välttymistä rakenteessa, tässä tapauksessa rakennuksen ulkovaipassa. Uuman reiitys on huomioitu laskennassa käyttäen Iso-Britanniassa, Manchesterin yliopistossa vuonna 2008 julkaistua B. Salhabin ja Y.C. Wangin laatiman tutkimuksen esittämää mitoitusmenetelmää. Mitoitusmenetelmässä uuman paksuutta muokataan kertomalla sitä mitoitusmenetelmällä määritettävällä reduktiokertoimella  $k_{red}$ .

Tutkimuksessa käsinlaskennan mitoitus tuloksille haluttiin varmuutta ja näin ollen tehtiin FEM-laskennalla tarkasteluja rakenteelle. Työn alkuperäisenä tavoitteena oli toteuttaa kuormituskoe rakenteelle kolmannen osapuolen toimesta, mutta valitettavasti johtuen rakenteen valmistamiseen vaadittavien työkalujen pitkästä toimitusajasta, tullaan kuormituskoe suorittamaan vasta tämän insinöörityön päätyttyä. FEM-laskenta antoi kuitenkin merkittävää tietoa laskennan tarkkuudesta. FEM-laskenta suoritettiin Finnfoam Oy:n toimitiloissa Salossa, yhdessä Finnfoamin mekaniikkasuunnittelijan kanssa, ja tuloksena saatiin hyvä korrelaatio käsinlaskennan kanssa.

Insinöörityö saavutti asetetut tavoitteensa. Tuloksena saatiin Z60-lämpörankaprofiili mitoitettua ja tarkastelua suoritettua useissa kuormitustilanteissa. Kirjallisen raportin lisäksi insinöörityön tuloksena laadittiin useita laskupohjia tilaajayrityksen käyttöön sekä erillinen ohjeistus kuormien määrittämiseen FEM-laskentaan. Tutkimuksen tulosten perusteella insinöörityössä mitoitettu rakenne sopii mekaanisesti työssä esitellyin reunaehdoin käytettäväksi seinärakenteena, näin ollen tilaajayrityksessä voidaan edetä uuden tuotteen tuomiseksi markkinoille.

Tulosten ohella tutkimus synnytti myös lisätutkimuskysymyksiä. Profiilin poikkileikkauksen mittojen tarkempi optimointi voi olla yksi kehityskohde. Tosin huomioiden tämän hetkiset profiilille asetetut tuotannolliset reunaehdot, eivät ne mahdollista toistaiseksi juurikaan tarkempaa optimointia. Tuotantomenetelmiä muuttamalla voitaisiin mahdollisesti laajentaa profiilin modifiointimahdollisuuksia. Tuotannon muuttaminen ei kuitenkaan välttämättä ole taloudellista tai tarpeenmukaista. Mahdollisilla muutoksilla saavutettava hyöty, voi jäädä varsin pieneksi profiilin pienten dimensioiden ja näin ollen rajallisten materiaalienekissä saavutettavien säästöjen vuoksi. Myös tämä on huomioitava asia mahdollisessa profiilin optimoinnissa.

Lisäksi huomioitavaa on, että tutkimus keskittyi mekaanisen kestävyysden tarkasteluun, tästä syystä rakennefysikaalisen toiminnan ja rangon lämmönjohtavuuden tarkastelu olisi suositeltavaa. Myös kustannuslaskenta rakenteelle on tarpeellista toteuttaa.

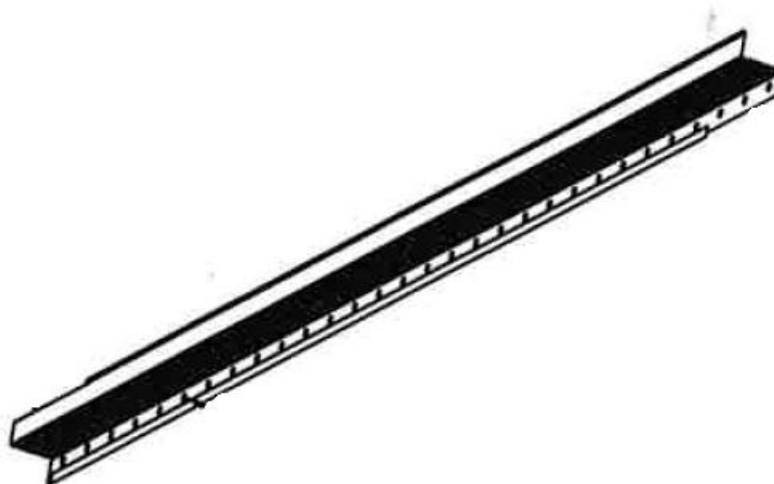
## Lähteet

- 1 Ramboll Finland Oy:n kotisivut, [http://www.ramboll.fi/ramboll\\_finland\\_oy](http://www.ramboll.fi/ramboll_finland_oy), luettu 13.11.2017
- 2 Finnfoam Oy:n kotisivut, <https://www.finnfoam.fi/finnfoam-oy/>, luettu 13.11.2017
- 3 KUVA 2, Finnfoam Oy:n kotisivut, <https://www.finnfoam.fi/tuotteet/finnfoam-eristelevyt/koostumus-ja-rakenne/>, luettu 13.11.2017
- 4 KUVA 2 ja KUVA 3, Finnfoam Oy
- 5 Höglund Torsten, Burstrand Helena. 1998. Slotted steel studs to reduce thermal bridges in insulated walls. Verkkolehti. Vol. 32(1-3). s.81-109, DOI: 10.1016/S0263-8231(98)00028-7. ISSN 0263-8231. Luettu 15.11.2017
- 6 Salhab B, Wang Y.C. 2008. Equivalent thickness of cold-formed thin-walled channel sections with perforated webs under compression. Thin-Walled Structures. Verkkolehti. Vol 46(7-9). s. 823-838. DOI: 10.1016/j.tws.2008.01.029. ISSN 0263-8231. Luettu 15.11.2017
- 7 Sinisalo Kalle. 2017. Kuopio. Uumareil'itetty teräsranka alapohjan kantavana rakenteena pientaloissa. Diplomityö
- 8 Hirviniemi Jukka. 2001. Kevyet teräsrakenteet talonrakennuksessa. Rakentajan kalenteri 2001. Rakennustieto. s. 583-587. Luettu 15.11.2017. Saatavissa: <https://www.rakennustieto.fi/Downloads/RK/RK010307.pdf>
- 9 Thöyry Tom. 2001. Strenght of Slotted Steel Studs. Lisensiaattityö. Royal Institute of Thchnology, Department of Structural Engineering. Tukholma, Ruotsi. s. 99 Luettu 15.11.2017. Saatavissa: [http://web.byv.kth.se/shared/pdf/67\\_Th%C3%B6yr%C3%A4%20T.%20b65.pdf](http://web.byv.kth.se/shared/pdf/67_Th%C3%B6yr%C3%A4%20T.%20b65.pdf). ISSN 1103-4270
- 10 KUVA 3, Blomberg Thomas. 1998. Heat Transmission Through Walls with Slotted Steel Studs. Proceedings of thermal performance of the exterior envelopes of buildings VII. Clearwater Beach, F1, USA s. 625
- 11 Blomberg Thomas, Cleasson Johan. 1998. Heat Transmission Through Walls with Slotted Steel Studs. Proceedings of thermal performance of the exterior envelopes of buildings VII. Clearwater Beach, F1, USA
- 12 RIL 167-1 Teräsrakenteet I. 1988. Helsinki: Suomen Rakennusinsinöörien Liitto RIL. ISBN 951-785-181-5
- 13 Penttinen Tuomo. 2012. Kuopio. Särmyksen simulointi ja käytäntö. Insinöörityö. Saatavilla: <http://www.theseus.fi/handle/10024/49589>

- 14 KUVA 5. Haikonen E, Aaltonen K. 1979. Ohutlevyrakenteiden suunnittelu yhteisvaikutuksessa ja pientuotannossa. MET, Tekninen tiedotus 18/1979. s.22
- 15 Kesti Jyrki. 2000. Espoo. Local and Distortional Buckling of Perforated Steel Wall Studs. Helsinki University of Tehnology Laboratory of Steel Structures Publications 19, TKK-TER-19. 101 s. + app. 19 s. ISBN 951-22-5223-6 (painettu), ISBN 954-22-5233-3 (sähköinen), ISSN 1456-4327
- 16 Teräsrakenneyhdistyksen kotisivut, <http://www.terasrakenneyhdistys.fi/fin/>, luettu 17.11.2017
- 17 KUVA 4. Rautaruukki Oyj:n kotisivut. <https://www.ruukki.com/fin/b2b/tuotteet/kan-tavat-ja-muut-profiilit/kevytorret/lightweight-purlins-details/termo-purlin>. Luettu 17.11.2017. Kuvaa on muokattu
- 18 Suomen Rakennusinsinöörienliitto RIL. 1992. RIL 167-2 Teräsrakenteet II. Helsinki.
- 19 KUVA 6, Thöyrä Tom. 2001. Strenght of Slotted Steel Studs. Lisensiaattityö. Royal Institute of Thchnology, Department of Structural Engineering. Tukholma, Ruotsi. s.11. Luettu 20.11.2017. Saatavissa: [http://web.byv.kth.se/shared/pdf/67\\_Th%C3%B6yr%C3%A4%20T.%20b65.pdf](http://web.byv.kth.se/shared/pdf/67_Th%C3%B6yr%C3%A4%20T.%20b65.pdf). ISSN 1103-4270
- 20 Laine Markku. 1993. Espoo. Avoprofiilisten kylmämuovattujen teräsohutlevyosien mitoitustutkimus. Diplomityö. Teknillinen korkeakoulu, Rakennus- ja maanmittaustekniikan osasto
- 21 KUVA 8, Suomen standardoimisliitto SFS r.y. 2005. SFS-EN 1993-1-3+AC:2006. Eurokoodi 3. Teräsrakenteiden suunnittelu. Osa 1-3: Yleiset säännöt. Lisäsäännöt kylmämuovatuille sauvoille ja levyille. S.30
- 22 KUVA 12, Suomen standardoimisliitto SFS r.y. 2006. SFS-EN 1993-1-3+AC:2006. Eurokoodi 3. Teräsrakenteiden suunnittelu. Osa 1-3: Yleiset säännöt. Lisäsäännöt kylmämuovatuille sauvoille ja levyille. S. 26. Kuvaa on muokattu
- 23 Suomen standardoimisliitto SFS r.y. 2006. SFS-EN 1993-1-3+AC:2006. Eurokoodi 3. Teräsrakenteiden suunnittelu. Osa 1-3: Yleiset säännöt. Lisäsäännöt kylmämuovatuille sauvoille ja levyille
- 24 KUVA 11. Salhab B, Wang Y.C. 2008. Equivalent thickness of cold-formed thin-walled channel sections with perforated webs under compression. Thin-Walled Structures. Verkkolehti. Vol 46(7-9). s. 825. DOI: 10.1016/j.tws.2008.01.029. ISSN 0263-8231. Luettu 23.11.2017
- 25 KUVA 5. Groover. M. P. 2010. Fundamentals of Modern Manufacturing, Processes, and Systems. John Wiley & Sons INC. Lehigh University. S.472. Kuvaa on muokattu

- 26 Kallio Sami. 2010. Helsinki. Asuinkerrostalon korjattavan seinärakenteen rakennusfysikaalinen selvitys. Insinöörityö
- 27 Suomen standardoimisliitto SFS r.y. 2006. SFS-EN 1993-1-5+AC:2006. Eurokoodi 3. Teräsrakenteiden suunnittelu. Osa 1-5: Levyrakenteet
- 28 Suomen standardoimisliitto SFS r.y. 2006. SFS-EN 1991-1-4+AC:2005. Eurokoodi 1. Rakenteiden kuormat. Osa 1-4: Yleiset kuormat. Tuulikuormat
- 29 Böhling Harry. 2014. Helsinki. Rakenteiden mekaniikka: kaavakokoelma. Ammattikorkeakoulun opetusmateriaalia
- 30 Böhling Harry. 2015. Helsinki. Rakenteiden mekaniikan perusteet. Ammattikorkeakoulun opetusmateriaalia
- 31 RIL-201-1-2017. 2017. Suunnitteluperusteet ja rakenteiden kuormat. Helsinki. Suomen Rakennusinsinöörienliitto RIL
- 32 KUVA 17. RIL-201-1-2017. 2017. Suunnitteluperusteet ja rakenteiden kuormat. Helsinki. Suomen Rakennusinsinöörienliitto RIL. S.131
- 33 KUVA 16. RIL-201-1-2017. 2017. Suunnitteluperusteet ja rakenteiden kuormat. Helsinki. Suomen Rakennusinsinöörienliitto RIL. S.136
- 34 Suomen standardoimisliitto SFS r.y. 2006. SFS-EN 1990+A1+AC. Eurokoodi. Rakenteiden suunnitteluperusteet
- 35 Ympäristöministeriö. 2007. Helsinki. Ympäristöministeriön asetus Eurocode-standardien soveltamisesta talonrakentamisessa
- 36 KUVA 19. Böhling Harry. 2014. Helsinki. Rakenteiden mekaniikka: kaavakokoelma. Ammattikorkeakoulun opetusmateriaalia. S.1
- 37 Vertex tuotedokumentaatio verkkosivut, <https://kb.vertex.fi/vxinfofi>, luettu 24.1.2018

# Poikkileikkaussuureiden laskenta Z60 t2 lämpörankaprofiilille



## Laskennan sisältö:

- Lähtötiedot	2
- Profiilin mitat	3
- Uuman rei'itys ja uuman rei'ityksen huomioiminen laskennassa	4
- Käsiteelliset leveydet	5
- Poikkileikkauksen bruttopinta-ala	6
- Profiilin painopisteen sijainti	7
- Profiilin bruttopoikkileikkauksen jäyhyysmomentti ja taivutusvastus	7
- Geometristen mittasuhteiden tarkistus	8
- Puristetun laipan puristuskestävyyden laskenta	9
- Puristetun laipan teholliset arvot	9
- Puristetun laipan reunakäänteen teholliset arvot	10
- Puristetun laipan taitoksen teholliset arvot	10
- Reunajäykisteen kimmoteorian mukainen kriittinen jännitys	11
-lteraatio	13
- Uuman tehollisten arvojen laskenta	17
-lteraatio	18
- Tehollisten poikkileikkausarvojen laskenta	22
- Teholliset poikkileikkausarvot kootusti	23

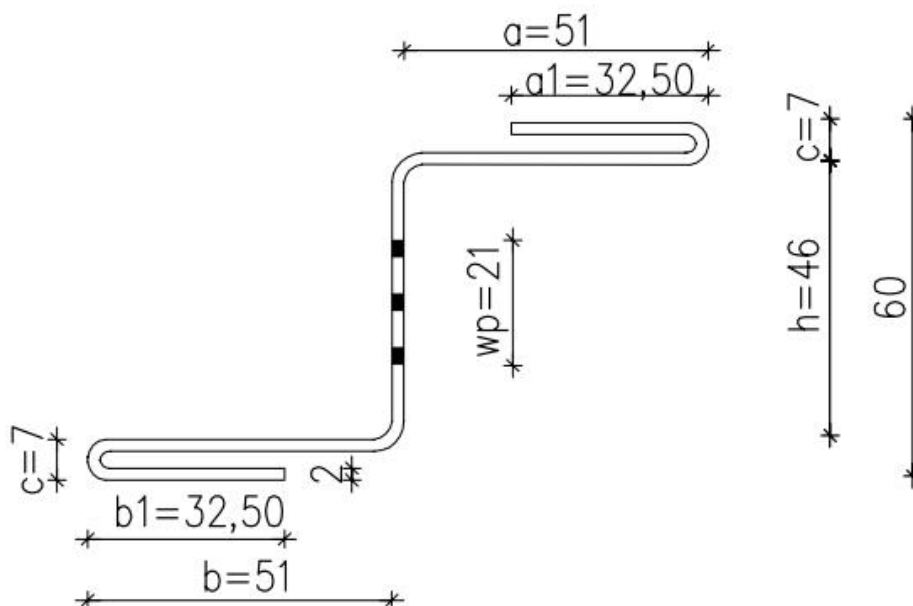


## Lähtötiedot

### *Materiaalin tiedot*

Eristeen tilavuuspaino XPS	$\rho_e := 0.4 \frac{\text{kN}}{\text{m}^3}$		
Teräksen tilavuuspaino	$\rho_s := 7850 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$		
Materiaali S350	$f_{yb} := 350 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$	Myötölujuus	
	$f_u := 420 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$	Murtoraja	
	$E := 210 \text{GPa}$	Kimmokerroin	
	$\varepsilon := \sqrt{\frac{235 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}}{f_{yb}}}$	$\varepsilon = 0.8$	EN1993-1-5, 4.4(2):
Osavarmuusluku teräkselle	$\gamma_{M0} := 1.00$		
Poissonin luku	$\nu := 0.3$		

**Profiilin tiedot:**  
**Uumareititetty Z-profiili**  
**Z60 t = 2 mm**



Profiilin nimellispaksuus  
-0.04mm Sinkityksen huomioiminen

$$t := (2 - 0.04) \text{ mm}$$

$$t = 1.96 \cdot \text{mm}$$

Kertoimen  $k_{\text{red}}$  :laskenta esitetään kohdassa "Uuman termoreiityksen vaikutuksen huomioiminen"

Uuman laskennallinen paksuus, joka huomioi termoreiityksen vaikutuksen

$$t_w = k_{\text{red}} \cdot t$$

$$t_w := 0.605 \cdot t = 1.186 \cdot \text{mm}$$

Laippojen tehollisten poikkileikkausarvojen laskentapaksuus

$$t_f := t$$

Profiilin korkeus, (+  $t_f = 2 \times$  puolet laipan paksuudesta)

$$h := 46 \text{ mm} + t_f = 48 \cdot \text{mm}$$

Ylälaipan leveys, (puristettu laippa)

$$a := 51 \text{ mm}$$

Alalaipan leveys, (vedetty laippa)

$$b := 51 \text{ mm}$$

Ylälaipan taitoksen leveys

$$a_1 := 32.5 \text{ mm}$$

Alalaipan taitoksen leveys

$$b_1 := 32.5 \text{ mm}$$

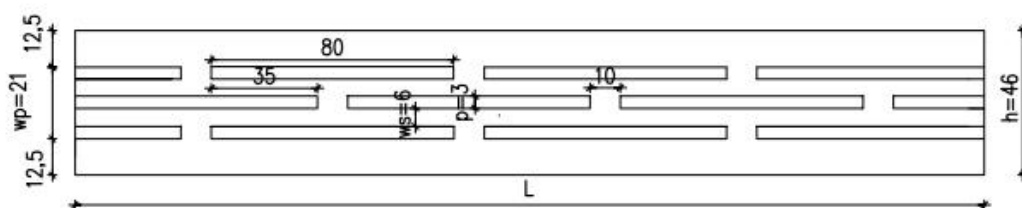
Taivutussäde

$$r := 3 \text{ mm}$$

Reunakäänteen kokonaiskorkeus

$$c := 7 \text{ mm}$$

## Uuman rei'itys



Reikien lukumäärä rangon leveyssuunnassa

$$n := 3$$

Reiän leveys

$$p := 3\text{mm}$$

Reikien välisen ehjän kaistaleen leveys rangon leveyssuunnassa

$$w_s := 6\text{mm}$$

Rei'itetyn alueen leveys uumassa

$$w_p := n \cdot p + (n - 1) \cdot w_s$$

$$w_p = 21 \cdot \text{mm}$$

Reikien kokonaisleveys

$$p_b := p \cdot n = 9 \cdot \text{mm}$$

Rei'itetyn alueen pituus rangon pituussuunnassa

$$L_p := L$$

Levyn leveys

$$b_{sw} := h - t_f = 46 \cdot \text{mm}$$

## Uuman termorei'ityksen vaikutuksen huomioiminen

Termorei'itys huomioidaan pienentämällä koko uuman paksuutta kertoimella  $k_{red}$ .

Kerroin määritetään käyttämällä Salhabin ja Wangin (2008) kehittämää mitoitusmenettelyä.

$$Y := \left( \frac{p_b}{b_{sw}} \right)^2 \cdot \left( \frac{w_s}{w_p} \right)^{\frac{1}{2}} = 0.02046$$

Salhab ja Wang (6) S.828

$$k_{red} = \sqrt[3]{c_1 + c_2 \cdot Y}$$

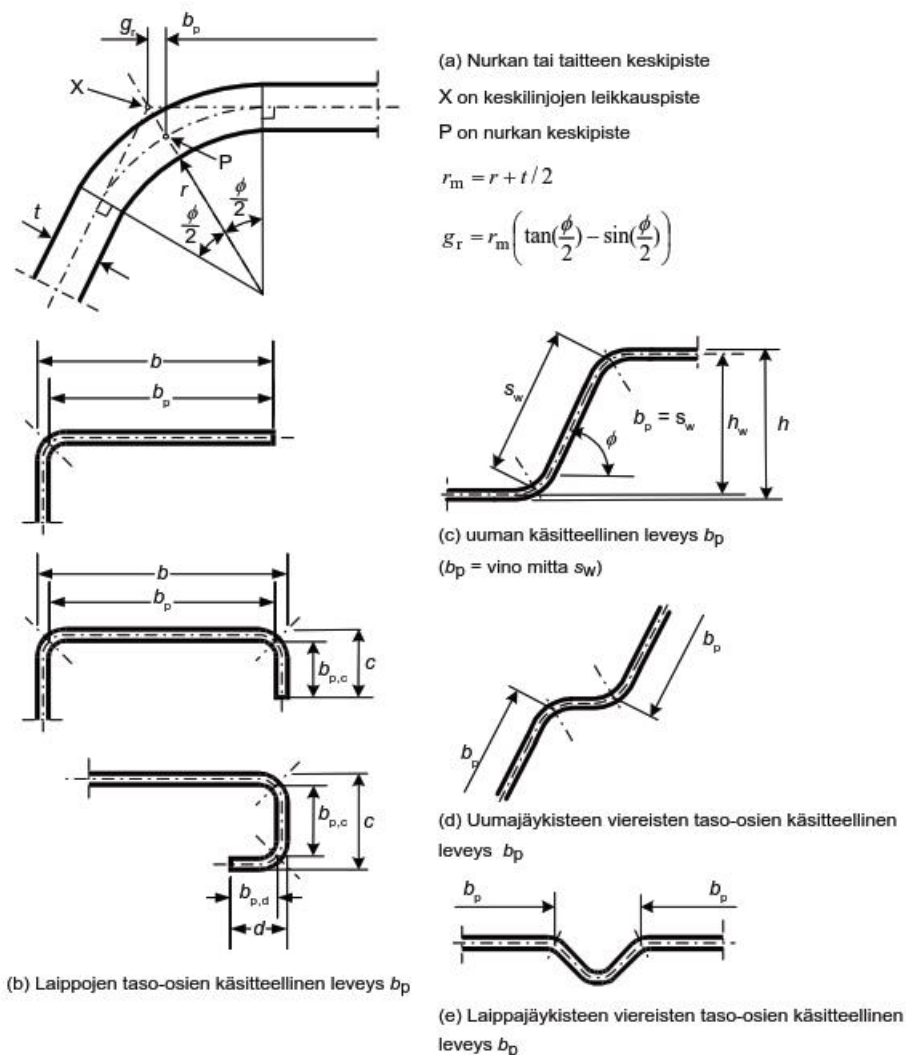
Salhab ja Wang (7a) S.829

$$c_1 := 0.608 - 1.7 \frac{t}{b_{sw}} = 0.536$$

$$c_2 := 70.256 \frac{t}{b_{sw}} - 18.33 = -15.336$$

$$k_{red} := \sqrt[3]{c_1 + c_2 \cdot Y} = 0.605$$

## Poikkileikkauksen taso-osien käsitteelliset leveydet ottaen huomioon nurkan pyöristyssäde "EN 1993-1-3, Kuva 5.1"



Kuva 5.1 Poikkileikkauksen taso-osien käsitteelliset leveydet  $b_p$  ottaen huomioon nurkan pyöristyssäde

$$r_m := r + \frac{t}{2}$$

$$\phi := \frac{\pi}{2}$$

Uuman käsitteellinen leveys

$$r_m = 4 \cdot \text{mm}$$

$$h_p := h - 2 \cdot \left[ \frac{t}{2} + r_m \cdot \left( \tan\left(\frac{\phi}{2}\right) - \sin\left(\frac{\phi}{2}\right) \right) \right]$$

$$h_p = 43.7 \cdot \text{mm}$$

Puristetun laipan käsitteellinen leveys

$$a_p := a - 2 \cdot \left[ \frac{t_f}{2} + r_m \cdot \left( \tan\left(\frac{\phi}{2}\right) - \sin\left(\frac{\phi}{2}\right) \right) \right]$$

$$a_p = 46.7 \cdot \text{mm}$$

Vedetyn laipan käsitteellinen leveys  $b_p := b - 2 \cdot \left[ \frac{t}{2} + r_m \cdot \left( \tan\left(\frac{\phi}{2}\right) - \sin\left(\frac{\phi}{2}\right) \right) \right]$

$$b_p = 46.7 \cdot \text{mm}$$

Puristetun laipan reunakäänteen käsitteellinen leveys  $a_{p1} := a_1 - \left[ \frac{t_f}{2} + r_m \cdot \left( \tan\left(\frac{\phi}{2}\right) - \sin\left(\frac{\phi}{2}\right) \right) \right]$

$$a_{p1} = 30.4 \cdot \text{mm}$$

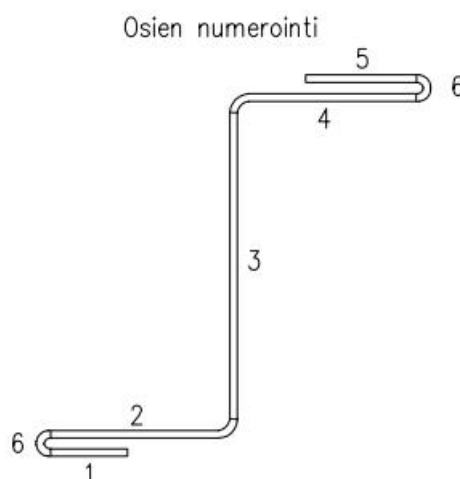
Vedetyn laipan reunakäänteen käsitteellinen leveys  $b_{p1} := b_1 - \left[ \frac{t}{2} + r_m \cdot \left( \tan\left(\frac{\phi}{2}\right) - \sin\left(\frac{\phi}{2}\right) \right) \right]$

$$b_{p1} = 30.4 \cdot \text{mm}$$

Laipan taitoksen käsitteellinen leveys  $c_p := c - 2 \cdot \left[ \frac{t_f}{2} + r_m \cdot \left( \tan\left(\frac{\phi}{2}\right) - \sin\left(\frac{\phi}{2}\right) \right) \right]$

$$c_p = 2.7 \cdot \text{mm}$$

## Poikkileikkauksen brutto pinta-ala



Alalaipan pinta-ala  $A_1 := t_f \cdot b_{p1}$   $A_1 = 59.5 \cdot \text{mm}^2$

$$A_2 := t_f \cdot b_p \quad A_2 = 91.5 \cdot \text{mm}^2$$

Uuman pinta-ala  $A_3 := t_w \cdot h_p$   $A_3 = 51.8 \cdot \text{mm}^2$

Ylälaipan pinta-ala  $A_4 := t_f \cdot a_p$   $A_4 = 91.5 \cdot \text{mm}^2$

$$A_5 := t_f \cdot a_{p1} \quad A_5 = 59.5 \cdot \text{mm}^2$$

Reunakäänteiden pinta-ala  $A_6 := t_f \cdot c$   $A_6 = 13.7 \cdot \text{mm}^2$

Kaikkien osien yhteenlaskettu brutto pinta-ala

$$A_{br} := A_1 + A_2 + A_3 + A_4 + A_5 + 2A_6 \quad A_{br} = 381.3 \cdot \text{mm}^2$$

## Profiilin painopisteen sijainti puristetun ylälaipan reunakäänteen yläpinnasta

Lasketaan painopisteen sijainti, soveltaen seuraavaa mekaniikan kaavaa:

$$e_c = \frac{\sum A_i \cdot y_i}{\sum A_i}$$

Lasketaan etäisyys vedetyn alalaipan alapinnasta

$e_c$

$$e_c := \frac{\left[ A_1 \cdot \frac{t}{2} + A_2 \cdot \left( c - \frac{t}{2} \right) + A_3 \cdot \left( c + \frac{h}{2} \right) + A_4 \cdot \left( c + h + \frac{t}{2} \right) + A_5 \cdot \left( c + h + c - \frac{t}{2} \right) \dots \right. \\ \left. + A_6 \cdot \left( \frac{c}{2} \right) + A_6 \cdot \left( c + h + \frac{c}{2} \right) \right]}{A_{br}}$$

Neutraaliakselin etäisyys vedetyn alalaipan alapinnasta

$$e_c = 30.98 \cdot \text{mm}$$

$$e_{c,br} := e_c - \frac{t_f}{2} = 30 \cdot \text{mm}$$

Neutraaliakselin etäisyys puristetun ylälaipan yläpinnasta

$$e_{c,ylä} := (h + 2c) - e_c = 30.98 \cdot \text{mm}$$

$$e_{c,ylä,tot} := e_{c,ylä} - \frac{t_f}{2} = 30 \cdot \text{mm}$$

## Brutto-poikkileikkausken jäyhyysmomentti ja taivutusvastus

Lasketaan Steinerin säännöllä  $I_z = \sum I_{oi} + \sum A_i \cdot y_i^2$

Alalaipan reunakäänte  $I_{y1} := \frac{b_{p1} \cdot t_f^3}{12} + A_1 \cdot \left( e_{c,br} - \frac{1}{2} t_f \right)^2$   $I_{y1} = 5 \times 10^4 \cdot \text{mm}^4$

Alalaippa  $I_{y2} := \frac{b_p \cdot t_f^3}{12} + A_2 \cdot \left( e_{c,br} - c + \frac{1}{2} t_f \right)^2$   $I_{y2} = 5.3 \times 10^4 \cdot \text{mm}^4$

Uma  $I_{y3} := 2 \left[ \frac{t_w \cdot \left[ \frac{(h - t_f)}{2} \right]^3}{12} + \frac{A_3 \cdot \left[ \frac{(h - t_f)}{2} \right]^2}{2} \right]$   $I_{y3} = 3 \times 10^4 \cdot \text{mm}^4$

Ylälaippa  $I_{y4} := \frac{a_p \cdot t_f^3}{12} + A_4 \cdot \left( e_{c,br} - c + \frac{t_f}{2} \right)^2$   $I_{y4} = 5.3 \times 10^4 \cdot \text{mm}^4$

Ylälaipan reunakäänte  $I_{y5} := \frac{a_{p1} \cdot t_f^3}{12} + A_5 \cdot \left( e_{c,br} - \frac{t_f}{2} \right)^2$   $I_{y5} = 5 \times 10^4 \cdot \text{mm}^4$

Alalaipan taitos  $I_{y6} := \frac{t_f \cdot c_p^3}{12} + A_6 \cdot \left( e_{c,br} - \frac{c}{2} \right)^2$   $I_{y6} = 9.64 \times 10^3 \cdot \text{mm}^4$

Ylälaipan taitos  $I_{y7} := \frac{t_f \cdot c_p^3}{12} + A_6 \cdot \left( e_{c,br} - \frac{c}{2} \right)^2$   $I_{y7} = 9.64 \times 10^3 \cdot \text{mm}^4$

Brutto-poikkileikkauksen jäyhyysmomentti

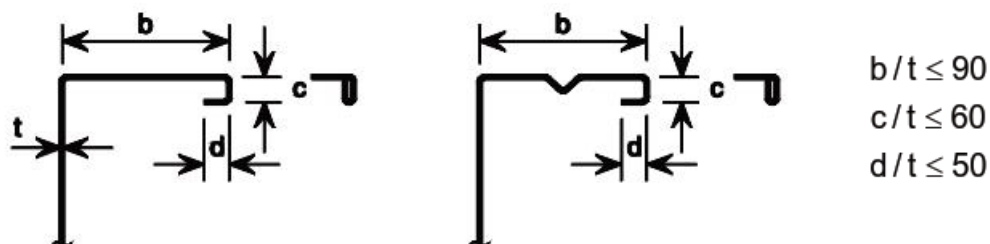
$$I_{y,br} := I_{y1} + I_{y2} + I_{y3} + I_{y4} + I_{y5} + I_{y6} + I_{y7} \quad I_{y,br} = 2.547 \times 10^5 \cdot \text{mm}^4$$

Brutto-poikkileikkauksen taivutusvastus

$$W_{br} := \frac{I_{y,br}}{e_{c,y\ddot{a}}} \quad W_{br} = 8.22 \times 10^3 \cdot \text{mm}^3$$

## Geometrinen mittasuhteiden tarkistus, "EN 1993-1-3, § 5.2"

EN 1993-1-3:n laskentaohjeita voidaan soveltaa, mikäli seuraavat ehdot täyttyvät



$$d := 23.5 \text{ mm}$$

(1)	$\frac{b}{t} \leq 90$	$\frac{b}{t} = 26$	OK
	$\frac{c}{t} \leq 60$	$\frac{c}{t} = 3.6$	OK
	$\frac{d}{t} \leq 50$	$\frac{d}{t} = 12$	OK

Riittävän jäykkyyden aikaansaamiseksi ja itse jäykisteen primäärin lommahtamisen välttämiseksi jäykisteiden mittojen tulee olla seuraavissa rajoissa:

(2)	$0.2 \leq \frac{c}{b} < 0.6$	$\frac{c}{b} = 0.1$	EI
	$0.1 \leq \frac{d}{b} \leq 0.3$	$\frac{d}{b} = 0.5$	EI

Jos  $c/b < 0.2$  tai  $d/b < 0.1$  reunakäännettä ei otata huomioon ( $c = 0$  tai  $d = 0$ )

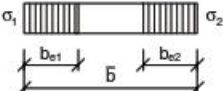
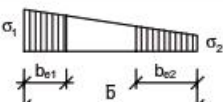
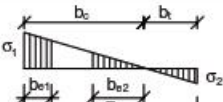
EN 1993-1-3 §5.2(2):

HUOM. 1 Kun poikkileikkauksen teholliset arvot meritetään kokeet ja laskelmat yhdistämällä, edellämainittuja rajoja ei sovelleta.

## Puristetun laipan puristuskestävyyden laskenta, "EN 1993-1-3, § 5.5.3.2"

Lasketaan jäykisteen tehollisen poikkileikkauksen alkuarvo käyttäen tehollisia leveyksiä, jotka lasketaan olettamalla, että jäykiste antaa täyden tuen ( $K = \infty$  ja että  $\sigma_{\text{com.Ed}} = \frac{f_{yb}}{\gamma M_0}$ ).

**Taulukko 4.1 Kahdelta reunalta tuetut taso-osat**

Jännitysjakautuma (puristus on positiivinen)				Tehollinen <sup>p</sup> leveys $b_{\text{eff}}$		
				$\psi = 1$ : $b_{\text{eff}} = \rho \cdot \bar{b}$ $b_{e1} = 0,5 b_{\text{eff}} \qquad b_{e2} = 0,5 b_{\text{eff}}$		
				$1 > \psi \geq 0$ : $b_{\text{eff}} = \rho \cdot \bar{b}$ $b_{e1} = \frac{2}{5 - \psi} b_{\text{eff}} \qquad b_{e2} = b_{\text{eff}} - b_{e1}$		
				$\psi < 0$ : $b_{\text{eff}} = \rho b_c = \rho \cdot \bar{b} \cdot (1 - \psi)$ $b_{e1} = 0,4 b_{\text{eff}} \qquad b_{e2} = 0,6 b_{\text{eff}}$		
$\psi = \sigma_2 / \sigma_1$	1	$1 > \psi > 0$	0	$0 > \psi > -1$	-1	$-1 > \psi > -3$
Lommahduskerroin $k_\psi$	4,0	$8,2 / (1,05 + \psi)$	7,81	$7,81 - 6,29\psi + 9,78\psi^2$	23,9	$5,98 (1 - \psi)^2$

### Puristetun laipan tehollisten arvojen laskenta

Puristetussa ylälaipassa on tasainen jännitys, eli taulukon 4.1 vaihtoehtoon 1-mukainen jännitys

### Puristetun laipan tehollinen leveys

Laipan jännityssuhde  $\Psi_f := 1$   
Laipan lommahduskerroin  $k_{\sigma,f} := 4.0$

Ylälaipan suhteellinen hoikkuus  $\lambda_{p,f} := \frac{\frac{a_p}{t_f}}{28.4 \cdot \epsilon \cdot \sqrt{k_{\sigma,f}}} \quad \lambda_{p,f} = 0.5$

$$\rho_f := \begin{cases} 1 & \text{if } \lambda_{p,f} \leq 0.673 \\ \frac{\lambda_{p,f} - 0.055 \cdot (3 + \Psi_f)}{\lambda_{p,f}^2} & \text{otherwise} \end{cases}$$

Laipan tehollisen leveyden laskentaan tarvittava pienennystekijä  $\rho_f = 1$

Pienennystekijän on 1.0 eli laippa ei lommahda. Tällöin koko laipan leveys voidaan huomioida poikkileikkauksuureita laskiessa poikkileikkauksen kestävyuden eduksi seuraavasti:

Puristetun laipan tehollinen leveys

$$\begin{aligned} a_{\text{eff}} &:= \rho_f \cdot a_p & a_{\text{eff}} &= 46.7 \cdot \text{mm} \\ a_{e1} &:= 0.5 \cdot a_{\text{eff}} = 23.4 \cdot \text{mm} \\ a_{e2} &:= 0.5 \cdot a_{\text{eff}} = 23.4 \cdot \text{mm} \end{aligned}$$



## Puristetun laipan reunakäänteen tehollinen leveys

Laipan reunakäänteessä on tasainen jännitys. Tehollinen leveys lasketaan EN1993-1-5 Taulukon 4.2 kohdan 1 mukaisesti:

Laipan reunakäänteen jännityssuhde  $\Psi_{f1} := 1$

Laipan reunakäänteen lommahduskerroin  $k_{\sigma,f1} := 0.43$

Laipan reunakäänteen suhteellinen hoikkuus

$$\lambda_{p,f1} := \frac{\frac{a_{p1}}{t_f}}{\left(28.4 \cdot \epsilon \cdot \sqrt{k_{\sigma,f1}}\right)} = 1$$

Laipan reunakäänteen tehollisen leveyden laskentaan tarvittava pienennystekijä

$$\rho_{f1} := \frac{\lambda_{p,f1} - 0.188}{\lambda_{p,f1}^2} = 0.8$$

Laipan reunakäänteen tehollinen leveys

$$a_{p1,e} := \rho_{f1} \cdot a_{p1} = 24.4 \cdot \text{mm}$$

## Laipan taitoksen tehollinen leveys

Puristetun ylälaipan taitoksen lommahduskerroin

$k_{\sigma,c} := 4$  EN1993-1-3.  
5.5.3.2.(5)

Kaksinkertainen reunajäykiste, lommahduskerroin saadaan:  
EN1993-1-5 Taulukko 4.1

Puristetun ylälaipan taitoksen suhteellinen hoikkuus

$$\lambda_{p,c} := \frac{\frac{c_p}{t_f}}{28.4 \cdot \epsilon \cdot \sqrt{k_{\sigma,c}}} \quad \lambda_{p,c} = 0.03$$

Ylälaipan taitoksen tehollisen leveyden laskentaan tarvittava pienennystekijä

$$\rho_c := \begin{cases} 1 & \text{if } \lambda_{p,c} \leq 0.748 \\ \frac{\lambda_{p,c} - 0.188}{\lambda_{p,c}^2} & \text{if } \lambda_{p,c} > 0.748 \end{cases} \quad \rho_c = 1$$

Puristetun ylälaipan taitoksen tehollinen leveys

$$c_{eff} := \rho_c \cdot c_p = 2.709 \cdot \text{mm}$$

Reunajäykisteen tehollinen pinta-ala

$$A_s := t_f \cdot (a_{e2} + c_{eff} + a_{p1,e}) = 98.8 \cdot \text{mm}^2$$

Reunajäykisteen painopisteen etäisyys ylälaipan suhteen

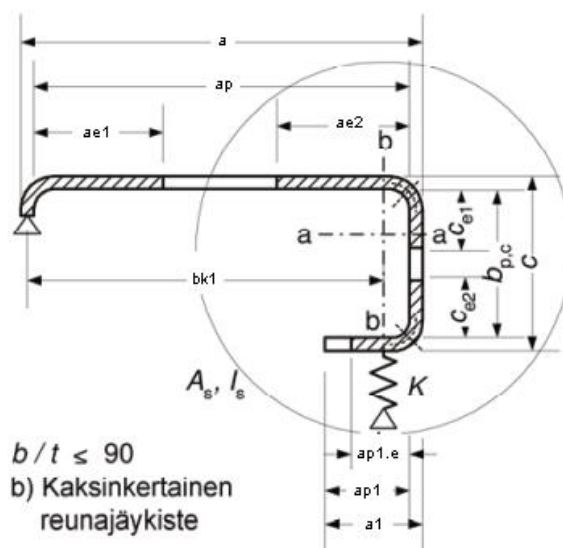
$$z_s := \frac{t_f \cdot c_{eff} \cdot \left(\frac{c}{2}\right) + t_f \cdot a_{p1,e} \cdot \left(c - \frac{t_f}{2}\right)}{A_s} = 3.097 \cdot \text{mm}$$

Reunajäykisteen jäyhyysmomentti

$$I_s := \frac{a_{e1} \cdot t_f^3}{12} + a_{e1} \cdot t_f \cdot z_s^2 + \frac{t_f \cdot c_{eff}^3}{12} + c_{eff} \cdot t_f \cdot \left(\frac{c_{eff}}{2} - z_s\right)^2 + \frac{a_{p1,e} \cdot t_f^3}{12} + a_{p1,e} \cdot t_f \cdot \left[\left(c - \frac{t_f}{2}\right) - z_s\right]^2$$

$$I_s = 896.4 \cdot \text{mm}^4$$

**Reunajäykisteen kimmoteorian mukainen kriittinen jännitys,  
"EN 1993-1-3, §5.5.3.2"**



Etäisyys uumasta reunajäykisteen tehollisen pinta-alan painopisteeseen

$$b_{k1} := \frac{a_{e2} \cdot t_f \cdot \left(a - \frac{3t_f}{2} - \frac{a_{e2}}{2}\right) + c_{eff} \cdot t_f \cdot \left(a - t_f\right) + a_{p1,e} \cdot t_f \cdot \left(a - \frac{3t_f}{2} - \frac{a_{p1,e}}{2}\right)}{a_{e2} \cdot t_f + c_{eff} \cdot t_f + a_{p1,e} \cdot t_f} = 36.8 \cdot \text{mm}$$

Reunajäykisteellisen Z-profiilin puristetun ylälaipan ekvivalentin jousen  $K_1$  kun palkkia taivutetaan y-y-akselin suhteen

$$K_1 = \frac{E \cdot t^3}{4 \cdot (1 - \nu^2)} \cdot \frac{1}{b_1^2 \cdot h_w + b_1^3 + 0.5 \cdot b_1 \cdot b_2 \cdot h_w \cdot k_f} \quad \text{EC1993-1-3, 5.5.3.1.(5)}$$

Koska alalaippa on vedetty:  $k_f := 0$

$$K_1 := \frac{E}{4 \cdot (1 - \nu^2) \cdot b_{k1}^2} \cdot \frac{1}{\left( \frac{h_p}{t_w^3} + \frac{b_{k1}}{t^3} \right)} = 1.36941 \cdot \frac{N}{\text{mm}^2}$$

Ekvivalentin jousen määrittäminen on esitetty tutkimuksen raportissa kohdassa:  
5.1.3. Reunakäänteellisen Z-profiilin ekvivalentin systeemin kiertymäjousen määrittäminen

Reunajäykisteen kimmoteorian mukainen kriittinen jännitys on tällöin

$$\sigma_{cr.s} := \frac{2 \cdot \sqrt{K_1 \cdot E \cdot I_s}}{A_s} = 324.9 \cdot \frac{N}{\text{mm}^2}$$

Jäykisteen muunnettu hoikkuus

$$\lambda_d := \sqrt{\frac{f_{yb}}{\sigma_{cr.s}}} = 1.038$$

Pienennystekijä  $\chi_d$  vinoutumisnurjahduksesta (jäykisteen taivutusnurjahdus) määritetään muunnetun hoikkuuden funktiona seuraavasti:

$$\chi_d := \begin{cases} 1 & \text{if } \lambda_d \leq 0.65 \\ (1.47 - 0.723 \cdot \lambda_d) & \text{if } 0.65 \leq \lambda_d < 1.38 \\ \frac{0.66}{\lambda_d} & \text{if } \lambda_d \geq 1.38 \end{cases} = 0.72$$

Koska pienennystekijä  $\chi_d < 1$ , jatketaan laskemista iteratiivisesti kunnes  $\chi_{d,n} \sim \chi_{d,(n-1)}$

Jos pienennystekijä  $\chi_d < 1$ , kyseessä olevaa arvoa voidaan tarkentaa iteratiivisesti.

Iterointi aloitetaan kohdan AC 5.5.2(1) mukaisella muunnetulla  $\rho$ :n arvolla, joka lasketaan

siten, että  $\sigma_{com.Ed.i}$  on yhtäsuuri kuin  $\chi_d \cdot \frac{f_{yb}}{\gamma_{M0}}$  siten, että  $\lambda_{p.red} = \lambda_1 \cdot \sqrt{\chi_d}$ :

$$\lambda_p := \lambda_{p.f}$$

## 1. Iteraatio, laippa

Muuttujille käytetään alaindeksiä .i1 ensimmäisessä iteroinnissa.

Aloitetaan iteraatio käyttämällä pienennettyä puristusjännitystä

$$\sigma_{\text{com.Ed}} := \chi_d \cdot \frac{f_{yb}}{\gamma_{M0}} = 251.8 \cdot \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

$$\lambda_{p,\text{red}} := \lambda_p \cdot \sqrt{\chi_d} = 0.4$$

Laipan tehollisen leveyden pienennystekijä

$$\rho_1 := \begin{cases} 1 & \text{if } \lambda_{p,\text{red}} \leq 0.748 \\ \frac{\lambda_{p,\text{red}} - 0.188}{\lambda_{p,\text{red}}^2} & \text{otherwise} \end{cases} = 1$$

Ylälaipan jännitysjakama, jäykisteen keskilinjan kohdalla tehollisen poikkileikkauksen perusteella

$$\sigma_1 := \frac{f_{yb}}{\gamma_{M0}} = 350 \cdot \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

$$\sigma_2 := \sigma_{\text{com.Ed}} = 251.8 \cdot \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

$$\Psi := \frac{\sigma_2}{\sigma_1} = 0.7$$

$$k_\sigma := \frac{8.2}{(1.05 + \Psi)} = 4.6$$

$$\lambda_{p,i1} := \frac{\frac{a_p}{t}}{128.4 \cdot \epsilon \cdot \sqrt{k_\sigma}} = 0.1$$

$$\rho_p := \begin{cases} 1 & \text{if } \lambda_{p,i1} \leq 0.673 \\ \frac{\lambda_{p,i1} - 0.055 \cdot (3 + \Psi)}{\lambda_{p,i1}^2} & \text{otherwise} \end{cases} = 1$$

$$a_{\text{eff},i1} := \rho_p \cdot a_p = 46.7 \cdot \text{mm}$$

$$a_{e1,i1} := \frac{2}{5 - \Psi} \cdot a_{\text{eff},i1} = 21.8 \cdot \text{mm}$$

EC1993-1-3, Taulukko 4.1

$$a_{e2,i1} := a_{\text{eff},i1} - a_{e1,i1} = 24.9 \cdot \text{mm}$$

Reunajäykisteen tehollinen pinta-ala

$$A_{s,i1} := t \cdot (a_{e2,i1} + c_{\text{eff}} + a_{p1,e}) = 101.8 \cdot \text{mm}^2$$

Reunajäkisteen painopisteen etäisyys

$$z_{s,i1} := \frac{t \cdot c_{eff} \left( c - \frac{c_{eff}}{2} \right) + a_{p1,e} \cdot t_f \left( c - \frac{t_f}{2} \right)}{A_{s,i1}} = 3.1 \cdot \text{mm}$$

Reunajäkisteen jäyhyysmomentti

$$I_{s,i1} := \frac{a_{e2,i1} \cdot t^3}{12} + a_{e2,i1} \cdot t \cdot (z_{s,i1})^2 + \frac{t \cdot c_{eff}^3}{12} + c_{eff} \cdot t \cdot \left( \frac{c_{eff}}{2} - z_{s,i1} \right)^2 \dots$$

$$+ \frac{a_{p1,e} \cdot t_f^3}{12} + a_{p1,e} \cdot t_f \cdot \left[ \left( c - \frac{t_f}{2} \right) - z_{s,i1} \right]^2$$

$$I_{s,i1} = 927.055 \cdot \text{mm}^4$$

Etäisyys uumasta reunajäkisteen tehollisen pinta-alan painopisteeseen

$$b_{k1,i1} := \frac{a_{e2,i1} \cdot t_f \left( a - \frac{3t_f}{2} - \frac{a_{e2,i1}}{2} \right) + c_{eff} \cdot t_f \cdot (a - t_f) + a_{p1,e} \cdot t_f \left( a - \frac{3t_f}{2} - \frac{a_{p1,e}}{2} \right)}{a_{e2,i1} \cdot t_f + c_{eff} \cdot t_f + a_{p1,e} \cdot t_f} = 36.4 \cdot \text{mm}$$

$$K_{1,i1} := \frac{E}{4(1 - \nu^2) \cdot b_{k1,i1}^2} \cdot \frac{1}{\left( \frac{h_p}{t_w^3} + \frac{b_{k1,i1}}{t_w^3} \right)} = 0.904 \cdot \frac{N}{\text{mm}^2}$$

Reunajäkisteen kimmoteorian mukainen kriittinen jännitys on tällöin

$$\sigma_{cr,s,i1} := \frac{2\sqrt{K_{1,i1} \cdot E \cdot I_{s,i1}}}{A_{s,i1}} = 260.6 \cdot \frac{N}{\text{mm}^2}$$

Jäkisteen muunnettu hoikkuus

$$\lambda_{d,i1} := \sqrt{\frac{f_{yb}}{\sigma_{cr,s,i1}}} = 1.2$$

Pienennystekijä  $\chi_d$  vinonurjahduksessa (jäykisteen taivutusnurjahdus) määritetään muunnetun hoikkuuden funktiona seuraavasti:

$$\chi_{d,i1} := \begin{cases} 1 & \text{if } \lambda_{d,i1} \leq 0.65 \\ \left( 1.47 - 0.723 \cdot \lambda_{d,i1} \right) & \text{if } 0.65 \leq \lambda_{d,i1} < 1.38 \\ \frac{0.66}{\lambda_{d,i1}} & \text{if } \lambda_{d,i1} \geq 1.38 \end{cases} = 0.632$$

## 2. Iteraatio, laippa

Muuttujille käytetään alaindeksiä i2 toisessa iteroinnissa.

Jatketaan iteraatiota käyttämällä pienennettyä puristusjännitystä

$$\sigma_{\text{com.Ed.i2}} := \chi_{d.i1} \cdot \frac{f_{yb}}{\gamma_{M0}} = 221.2 \cdot \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

$$\lambda_{p.\text{red.i2}} := \lambda_p \cdot \sqrt{\chi_{d.i1}} = 0.4$$

Laipan tehollisen leveyden pienennystekijä

$$\rho_{1.i2} := \begin{cases} 1 & \text{if } \lambda_{p.\text{red.i2}} \leq 0.748 \\ \frac{\lambda_{p.\text{red.i2}} - 0.188}{\lambda_{p.\text{red.i2}}^2} & \text{otherwise} \end{cases} = 1$$

Ylälaipan jännitysjakama, jäykisteen keskilinjän kohdalla tehollisen poikkileikkauksen perusteella

$$\sigma_{1.i2} := \frac{f_{yb}}{\gamma_{M0}} = 350 \cdot \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

$$\sigma_{2.i2} := \sigma_{\text{com.Ed}} = 251.8 \cdot \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

$$\Psi_{i2} := \frac{\sigma_2}{\sigma_1} = 0.7$$

$$k_{\sigma.i2} := \frac{8.2}{(1.05 + \Psi_{i2})} = 4.6$$

$$\lambda_{p.i2} := \frac{\frac{a_p}{t}}{128.4 \cdot \epsilon \cdot \sqrt{k_{\sigma}}} = 0.1$$

$$\rho_{p.i2} := \begin{cases} 1 & \text{if } \lambda_{p.i2} \leq 0.673 \\ \frac{\lambda_{p.i2} - 0.055 \cdot (3 + \Psi_{i2})}{\lambda_{p.i2}^2} & \text{otherwise} \end{cases} = 1$$

$$a_{\text{eff.i2}} := \rho_{p.i2} \cdot a_p = 46.7 \cdot \text{mm}$$

$$a_{e1.i2} := \frac{2}{5 - \Psi_{i2}} \cdot a_{\text{eff.i2}} = 21.8 \cdot \text{mm}$$

EC1993-1-3, Taulukko 4.1

$$a_{e2.i2} := a_{\text{eff.i2}} - a_{e1.i2} = 24.9 \cdot \text{mm}$$

Reunajäykisteen tehollinen pinta-ala

$$A_{s.i2} := t_f \cdot (a_{e2.i2} + c_{\text{eff}} + a_{p1.e}) = 101.8 \cdot \text{mm}^2$$

Reunajäkisteen painopisteen etäisyys  $z_{s,i2} := \frac{t_f \cdot c_{eff} \left( c - \frac{c_{eff}}{2} \right) + a_{p1,e} \cdot t_f \left( c - \frac{t_f}{2} \right)}{A_{s,i2}} = 3.1 \cdot \text{mm}$

Reunajäkisteen jäyhyysmomentti

$$I_{s,i2} := \frac{a_{e2,i2} \cdot t^3}{12} + a_{e2,i2} \cdot t \cdot (z_{s,i2})^2 + \frac{t \cdot c_{eff}^3}{12} + c_{eff} \cdot t \cdot \left( \frac{c_{eff}}{2} - z_{s,i2} \right)^2 \dots$$

$$+ \frac{a_{p1,e} \cdot t_f^3}{12} + a_{p1,e} \cdot t_f \cdot \left[ \left( c - \frac{t_f}{2} \right) - z_{s,i2} \right]^2$$

$$I_{s,i2} = 927.055 \cdot \text{mm}^4$$

Etäisyys uumasta reunajäkisteen tehollisen pinta-alan painopisteeseen

$$b_{k1,i2} := \frac{a_{e2,i2} \cdot t_f \left( a - \frac{3t_f}{2} - \frac{a_{e2,i2}}{2} \right) + c_{eff} \cdot t_f (a - t_f) + a_{p1,e} \cdot t_f \left( a - \frac{3t_f}{2} - \frac{a_{p1,e}}{2} \right)}{a_{e2,i2} \cdot t_f + c_{eff} \cdot t_f + a_{p1,e} \cdot t_f} = 36.4 \cdot \text{mm}$$

$$K_{1,i2} := \frac{E}{4(1 - \nu^2) \cdot b_{k1,i2}^2} \cdot \frac{1}{\left( \frac{h_p}{t_w^3} + \frac{b_{k1,i2}}{t_w^3} \right)} = 0.904 \cdot \frac{N}{\text{mm}^2}$$

Reunajäkisteen kimmoiteorian mukainen kriittinen jännitys on tällöin

$$\sigma_{cr,s,i2} := \frac{2\sqrt{K_{1,i2} \cdot E \cdot I_{s,i2}}}{A_{s,i2}} = 260.6 \cdot \frac{N}{\text{mm}^2}$$

Jäkisteen muunnettu hoikkuus

$$\lambda_{d,i2} := \sqrt{\frac{f_{yb}}{\sigma_{cr,s,i2}}} = 1.2$$

Pienennystekijä  $\chi_d$  vinonurjahduksessa (jäykisteen taivutusnurjahdus) määritetään muunnetun hoikkuuden funktiona seuraavasti:

$$\chi_{d,i2} := \begin{cases} 1 & \text{if } \lambda_{d,i2} \leq 0.65 \\ \left( 1.47 - 0.723 \cdot \lambda_{d,i2} \right) & \text{if } 0.65 \leq \lambda_{d,i2} < 1.38 \\ \frac{0.66}{\lambda_{d,i2}} & \text{if } \lambda_{d,i2} \geq 1.38 \end{cases} = 0.632$$

Toisen iteraation tulos on sama kuin ensimmäisen iteraatiokierroksen. Lopetetaan iteraatio tähän.

## Puristetun laipan teholliset arvot

Pienennystekijä

$$\chi_{d,i2} = 0.6$$

$$a_{e1,i2} = 21.8 \cdot \text{mm}$$

$$a_{e2,i2} = 24.9 \cdot \text{mm}$$

$$c_{\text{eff}} = 2.7 \cdot \text{mm}$$

Jäykisteen redusoitu paksuus

$$t_{\text{red}} := \chi_{d,i2} \cdot t = 1.2 \cdot \text{mm}$$

## Uuman tehollisten arvojen laskenta

Uumassa on taulukon 4.1 vaihtoehdon 3 mukainen jännitys

Neutraaliakselin sijainti puristetun ylälaipan reunakäänteeseen nähden

$$h_c := \left[ \frac{c_p \cdot t_f \left( h + 2c - \frac{c}{2} \right) + b_p \cdot t_f \left( h + c + \frac{t_f}{2} \right) + h \cdot t_w \left( \frac{h}{2} + c \right) + c \cdot t_f \cdot \frac{c}{2} + a_p \cdot t_f \left( c - \frac{t_f}{2} \right) \dots}{c_p \cdot t_f + b_p \cdot t + h \cdot t_w + c \cdot t_f + a_p \cdot t_f + a_{p1} \cdot t_f + b_{p1} \cdot t_f} \right] - t_f$$

$$h_c = 28.4 \cdot \text{mm}$$

Uuman jännityssuhde

$$\Psi_w := \frac{h_c - h_p}{h_c} = -0.5$$

Uuman lommahduskerroin

$$k_{\sigma,w} := 7.81 - 6.29\Psi_w + 9.78\Psi_w^2 = 14$$

Uuman suhteellinen hoikkuus

$$\lambda_{p,w} := \frac{\frac{h_p}{t_w}}{28.4\epsilon \cdot \sqrt{k_{\sigma,w}}} \quad \lambda_{p,w} = 0.4$$

Uuman tehollisen korkeuden laskentaan tarvittava pienennystekijä, kahdelta reunalta tuettu taso-osa

$$\rho_w := \begin{cases} 1 & \text{if } \lambda_{p,w} \leq 0.673 \\ \frac{\lambda_{p,w} - 0.055 \cdot (3 + \Psi_w)}{\lambda_{p,w}^2} & \text{otherwise} \end{cases} = 1 \quad \text{EC 1993-1-5 4.4.(2)}$$

Uuman puristetun alueen tehollinen korkeus

$$h_{\text{eff}} := \rho_w \cdot e_c = 31 \cdot \text{mm}$$

Puristettu alue lähellä ylä-laippaa

$$h_{e1} := 0.4 \cdot h_{\text{eff}} = 12.4 \cdot \text{mm}$$

Puristettu alue lähellä neutraaliakselia

$$h_{e2} := 0.6 \cdot h_{\text{eff}} = 18.6 \cdot \text{mm}$$



Uuman efektiiviset korkeudet ovat

Alue lähellä puristettua ylälaippaa  $h_1 := h_{e1} = 12.4 \cdot \text{mm}$

Alue lähellä vedettyä alalaippaa  $h_2 := h_p - (h_c - h_{e2}) = 33.8 \cdot \text{mm}$

Tehollisen poikkileikkauksen pinta-ala

$$A_{\text{eff}} := 2c_p \cdot t_f + b_p \cdot t_f + t_w \cdot (h_1 + h_2) + t \cdot a_{e1.i2} + t_f \cdot a_{e2.i2} + a_{p1.e} \cdot t_f + b_{p1} \cdot t_f = 355.8 \cdot \text{mm}^2$$

Tehollisen poikkileikkauksen neutraaliakseli suhteessa puristettun ylälaipan reunakääntöseen

$$z_c := \left[ \frac{c_p \cdot t_f \cdot \left(h - \frac{c}{2}\right) + b_p \cdot t_f \cdot \left(c + h + \frac{t_f}{2}\right) + h_2 \cdot t_w \cdot \left(c + h - \frac{h_2}{2}\right) + h_1 \cdot t_w \cdot \left(c + \frac{h_1}{2}\right) + c_p \cdot t_f \cdot \left(\frac{c}{2}\right) \dots}{A_{\text{eff}}} \right] - t_f$$

$$z_c = 29.9 \cdot \text{mm}$$

Tehollisen poikkileikkauksen neutraaliakseli suhteessa vedettyyn alalaippaan

$$z_t := h + 2c - z_c - t_f = 30.138 \cdot \text{mm}$$

## 1. Iteraatio, Uuma

Iteroidaan uuman tehollisia poikkileikkausarvoja

Muuttujille käytetään alaindeksiä .i1 ensimmäisessä iteroinnissa

Jännityssuhde  $\Psi_{w.i1} := \frac{z_c - h_p}{z_c} = -0.5$

Lomahduskerroin  $k_{\sigma,w.i1} := 7.81 - 6.29\Psi_{w.i1} + 9.78 \cdot \Psi_{w.i1}^2 = 12.8$

Suhteellinen hoikkuus  $\lambda_{p,w.i1} := \frac{\frac{h_p}{t_w}}{28.4 \cdot \epsilon \cdot \sqrt{k_{\sigma,w.i1}}} = 0.4$

Pienennystekijä  $\rho_{w.i1} := \begin{cases} 1 & \text{if } \lambda_{p,w.i1} \leq 0.673 \\ \frac{\lambda_{p,w.i1} - 0.055 \cdot (3 + \Psi_{w.i1})}{\lambda_{p,w.i1}^2} & \text{otherwise} \end{cases} = 1$

Uuman puristetun alueen tehollinen korkeus  $h_{\text{eff.i1}} := \rho_{\text{w.i1}} \cdot z_c = 29.9 \cdot \text{mm}$

Puristettu alue lähellä ylälaippaa  $h_{\text{e1.i1}} := 0.4 \cdot h_{\text{eff.i1}} = 11.9 \cdot \text{mm}$

Puristettu alue lähellä neutraaliakselia  $h_{\text{e2.i1}} := 0.6 \cdot h_{\text{eff.i1}} = 17.9 \cdot \text{mm}$

Uuman efektiiviset korkeudet 1. iteraation jälkeen ovat

Alue lähellä puristettua ylälaippaa  $h_{1.i1} := h_{\text{e1.i1}} = 11.9 \cdot \text{mm}$

Alue lähellä vedettyä alalaippaa  $h_{2.i1} := h_p - (z_c - h_{\text{e2.i1}}) = 31.7 \cdot \text{mm}$

Tehollisen poikkileikkauksen pinta-ala

$$A_{\text{eff.i1}} := c_p \cdot t_f + b_p \cdot t_f + t_w \cdot (h_{1.i1} + h_{2.i1}) + t \cdot a_{\text{e1.i2}} + t_{\text{red}} \cdot (a_{\text{e2.i2}} + c_{\text{eff}}) + (a_{\text{p1.e}} \cdot t_f + b_{\text{p1}} \cdot t_f)$$

$$A_{\text{eff.i1}} = 332.9 \cdot \text{mm}^2$$

Tehollisen poikkileikkauksen neutraaliakseli suhteessa puristetun ylälaipan reunakäänteeseen

$$z_{\text{c.i1}} := \frac{\left[ c_p \cdot t_f \cdot \left( h - \frac{c}{2} \right) + b_p \cdot t_f \cdot \left( c + h + \frac{t_f}{2} \right) + h_{2.i1} \cdot t_w \cdot \left( c + h - \frac{h_{2.i1}}{2} \right) + h_{1.i1} \cdot t_w \cdot \left( c + \frac{h_{1.i1}}{2} \right) \dots \right.}{A_{\text{eff}}} - t_f$$

$$z_{\text{c.i1}} = 29.7 \cdot \text{mm}$$

Tehollisen poikkileikkauksen neutraaliakseli suhteessa vedettyyn alalaipan reunakäänteeseen

$$z_{\text{t.i1}} := h + 2c - z_{\text{c.i1}} - t_f = 30.324 \cdot \text{mm}$$

## 2. Iteraatio, Uuma

Iteroidaan uuman tehollisia poikkileikkausarvoja  
Muuttujille käytetään alaindeksiä .i2 toisessa iteroinnissa

$$\text{Jännityssuhde} \quad \Psi_{w.i2} := \frac{z_{c.i1} - h_p}{z_{c.i1}} = -0.5$$

$$\text{Lommahduskerroin} \quad k_{\sigma.w.i2} := 7.81 - 6.29\Psi_{w.i2} + 9.78 \cdot \Psi_{w.i2}^2 = 12.9$$

$$\text{Suhteellinen hoikkuus} \quad \lambda_{p.w.i2} := \frac{\frac{h_p}{t_w}}{28.4 \cdot \epsilon \cdot \sqrt{k_{\sigma.w.i2}}} = 0.4$$

$$\text{Pienennystekijä} \quad \rho_{w.i2} := \begin{cases} 1 & \text{if } \lambda_{p.w.i2} \leq 0.673 \\ \frac{\lambda_{p.w.i2} - 0.055 \cdot (3 + \Psi_{w.i2})}{\lambda_{p.w.i2}^2} & \text{otherwise} \end{cases} = 1$$

$$\text{Uuman puristetun alueen tehollinen korkeus} \quad h_{eff.i2} := \rho_{w.i2} \cdot z_{c.i1} = 29.7 \cdot \text{mm}$$

$$\text{Puristettu alue lähellä ylälaippaa} \quad h_{e1.i2} := 0.4 \cdot h_{eff.i2} = 11.9 \cdot \text{mm}$$

$$\text{Puristettu alue lähellä neutraaliakselia} \quad h_{e2.i2} := 0.6 \cdot h_{eff.i2} = 17.8 \cdot \text{mm}$$

Uuman efektiiviset korkeudet 2. iteraation jälkeen ovat

$$\text{Alue lähellä puristettua ylälaippaa} \quad h_{1.i2} := h_{e1.i2} = 11.9 \cdot \text{mm}$$

$$\text{Alue lähellä vedettyä alalaippaa} \quad h_{2.i2} := h_p - (z_{c.i1} - h_{e2.i2}) = 31.8 \cdot \text{mm}$$

Tehollisen poikkileikkauksen pinta-ala

$$A_{eff.i2} := 2c_p \cdot t_f + b_p \cdot t_f + t_w \cdot (h_{1.i2} + h_{2.i2}) + t_f \cdot a_{e1.i2} + t_f \cdot a_{e2.i2} + a_{p1.e} \cdot t_f + b_{p1} \cdot t_f$$

$$A_{eff.i2} = 352.8 \cdot \text{mm}^2$$

Tehollisen poikkileikkauksen neutraaliakseli suhteessa puristetun ylälaipan reunakäänteeseen

$$z_{c.i2} := \frac{\left[ c_p \cdot t_f \cdot \left( h - \frac{c}{2} \right) + b_p \cdot t_f \cdot \left( c + h + \frac{t_f}{2} \right) + h_{2.i2} \cdot t_w \cdot \left( c + h - \frac{h_{2.i2}}{2} \right) + h_{1.i2} \cdot t_w \cdot \left( c + \frac{h_{1.i2}}{2} \right) \dots \right.}{A_{eff.i2}} - t_f$$

$$z_{c.i2} = 30 \cdot \text{mm}$$

Neutraaliakselin sijainti vedetyn alalaipan reunakäänteestä

$$z_{t.i2} := h + 2c - z_{c.i2} - t_f = 30.049 \cdot \text{mm}$$

### 3. Iteraatio, Uuma

Iteroidaan uuman tehollisia poikkileikkausarvoja  
Muuttujille käytetään alaindeksiä i3 kolmannessa iteroinnissa

$$\text{Jännityssuhde} \quad \Psi_{w.i3} := \frac{z_{c.i2} - h_p}{z_{c.i2}} = -0.5$$

$$\text{Lommahduskerroin} \quad k_{\sigma.w.i3} := 7.81 - 6.29\Psi_{w.i3} + 9.78 \cdot \Psi_{w.i3}^2 = 12.7$$

$$\text{Suhteellinen hoikkuus} \quad \lambda_{p.w.i3} := \frac{\frac{h_p}{t_w}}{28.4 \cdot \epsilon \cdot \sqrt{k_{\sigma.w.i3}}} = 0.4$$

$$\text{Pienennystekijä} \quad \rho_{w.i3} := \begin{cases} 1 & \text{if } \lambda_{p.w.i3} \leq 0.673 \\ \frac{\lambda_{p.w.i3} - 0.055 \cdot (3 + \Psi_{w.i3})}{\lambda_{p.w.i3}^2} & \text{otherwise} \end{cases} = 1$$

$$\text{Uuman puristetun alueen tehollinen korkeus} \quad h_{eff.i3} := \rho_{w.i3} \cdot z_{c.i2} = 30 \cdot \text{mm}$$

$$\text{Puristettu alue lähellä ylälaippaa} \quad h_{e1.i3} := 0.4 \cdot h_{eff.i3} = 12 \cdot \text{mm}$$

$$\text{Puristettu alue lähellä neutraaliakselia} \quad h_{e2.i3} := 0.6 \cdot h_{eff.i3} = 18 \cdot \text{mm}$$

Uuman efektiiviset korkeudet 3. iteraation jälkeen ovat

$$\text{Alue lähellä puristettua ylälaippaa} \quad h_{1.i3} := h_{e1.i3} = 12 \cdot \text{mm}$$

$$\text{Alue lähellä vedettyä alalaippaa} \quad h_{2.i3} := h_p - (z_{c.i2} - h_{e2.i3}) = 31.7 \cdot \text{mm}$$

Tehollisen poikkileikkauksen pinta-ala

$$A_{eff.i3} := 2c_p \cdot t_f + b_p \cdot t_f + t_w \cdot (h_{1.i3} + h_{2.i3}) + t_f \cdot a_{e1.i2} + t_f \cdot a_{e2.i2} + a_{p1.e} \cdot t_f + b_{p1} \cdot t_f$$

$$A_{eff.i3} = 352.8 \cdot \text{mm}^2$$

Tehollisen poikkileikkauksen neutraaliakseli suhteessa puristettun ylälaipan reunakäänteeseen

$$z_{c.i3} := \left[ \frac{c_p \cdot t_f \left( h - \frac{c}{2} \right) + b_p \cdot t_f \left( c + h + \frac{t_f}{2} \right) + h_{2.i3} \cdot t_w \left( c + h - \frac{h_{2.i3}}{2} \right) + h_{1.i3} \cdot t_w \left( c + \frac{h_{1.i3}}{2} \right) \dots}{A_{eff.i3}} \right] - t_f$$

$$z_{c.i3} = 29.9 \cdot \text{mm}$$

Neutraaliakselin sijainti vedetyn alalaipan reunakäänteestä

$$z_{t.i3} := h + 2c - z_{c.i3} - t_f = 30.1 \cdot \text{mm}$$

Todetaan: Kolmannen iteroinnin jälkeen poikkileikkauksen suuret ovat riittävän lähellä todellisia arvoja. Lopetetaan iterointi

## Tehollisten arvojen laskenta

Tehollinen jäyhyysmomentti

$$\begin{aligned} I_{y.\text{eff}} := & \frac{t \cdot c_p^3}{12} + \frac{b_p \cdot t^3}{12} + \frac{t_w \cdot h_{2.i3}^3}{12} + \frac{t_w \cdot h_{1.i3}^3}{12} + \frac{a_{e1.i2} \cdot t^3}{12} + \frac{a_{e2.i2} \cdot t^3}{12} + \frac{t_{\text{red}} \cdot c_{\text{eff}}^3}{12} \dots \\ & + \frac{a_{p1.e} \cdot t^3}{12} + \frac{b_{p1} \cdot t^3}{12} + c_p \cdot t \left( z_{t.i3} - \frac{c}{2} \right)^2 + b_p \cdot t \left( z_{t.i3} - c + \frac{t_f}{2} \right)^2 \dots \\ & + h_{2.i3} \cdot t_w \left( z_{t.i3} - c - \frac{h_{2.i3}}{2} \right)^2 + h_{1.i3} \cdot t_w \left( z_c - c - \frac{h_{1.i3}}{2} \right)^2 \dots \\ & + a_{e1.i2} \cdot t \left( z_{c.i3} - c + \frac{t_f}{2} \right)^2 + a_{e2.i2} \cdot t_{\text{red}} \left( z_{c.i3} - c + \frac{t_f}{2} \right)^2 + c_{\text{eff}} \cdot t_{\text{red}} \left( z_{c.i3} - \frac{c}{2} \right)^2 \dots \\ & + a_{p1.e} \cdot t_f \left( z_{c.i3} - \frac{t_f}{2} \right)^2 + b_{p1} \cdot t_f \left( z_{t.i3} - \frac{t_f}{2} \right)^2 \end{aligned}$$

$$I_{y.\text{eff}} = 2.0087 \times 10^5 \cdot \text{mm}^4$$

Tehollinen taivutusvastus

$$W_{y.\text{eff}} := \frac{I_{y.\text{eff}}}{z_{c.i3}} = 6.7072 \times 10^3 \cdot \text{mm}^3$$

Tehollinen poikkipinta-ala

$$A_{\text{eff.tot}} := A_{\text{eff.i3}} = 352.8 \cdot \text{mm}^2$$

## Teholliset poikkileikkausarvot kootusti

Neutraaliakselin sijainti puristetun ylälaipan reunakäänteestä

$$z_{c,tot} := z_{c,i3} = 29.9 \cdot \text{mm}$$

Neutraaliakselin sijainti suhteessa vedettyn alalaipan reunakäänteeseen

$$z_{t,tot} := z_{t,i3} = 30.1 \cdot \text{mm}$$

Tehollinen poikkipinta-ala

$$A_{\text{eff.tot}} = 352.8 \cdot \text{mm}^2$$

Tehollinen jäyhyysmomentti

$$I_{y,\text{eff}} = 2.0087 \times 10^5 \cdot \text{mm}^4$$

Tehollinen taivutusvastus

$$W_{y,\text{eff}} = 6.7072 \times 10^3 \cdot \text{mm}^3$$

Taivutuskapasiteetti

$$M_{y,Rd} := f_{yb} \cdot \frac{W_{y,\text{eff}}}{\gamma_{M0}} = 2.348 \cdot \text{kN} \cdot \text{m}$$

# Mitoitus Z60t2 lämpörankaprofiilille

## Sisältö

- Lähtötiedot	1
- Materiaalin tiedot	1
- Profiilin tiedot	2
- Tuulikuorman laskenta	3
- Puuskanopeuspaine	3
- Kokonaistuulivoiman laskenta voimakertoimen c.f avulla	3
- Murtorajatilan kuormayhdistelmä	4
- Voimasuureet	4
- Mitoitus	5
- Taivutuskestävyys	5
- Leikkauslommahduskestävyys	5
- Taipuma	6
- Tulokset	7

## Lähtötiedot

Luotettavuusluokka	RC2	
Seuramusluokka	CC2	$K_{FI} := 1.0$
Suunniteltu käyttöikä	50 Vuotta	

## Materiaalin tiedot

Teräksen tilavuuspaino	$\rho_s := 7850 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$	
Materiaali S350	$f_{yb} := 350 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$	Myötölujuus
	$f_u := 420 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$	Murtoraja
	$E_s := 210\text{GPa}$	Kimmokerroin

### **Profiilin tiedot**

Orren nimellispaksuus	$t := 2\text{mm}$
Orren laskenta paksuus, (-0.04mm Sinkityksen huomioiminen)	$t_a := t - 0.04\text{mm} = 1.96\cdot\text{mm}$
Uuman redusoitu paksuus	$t_{\text{eff}} := 0.605 \cdot t = 1.21\cdot\text{mm}$
Profiilin korkeus, (+ $t_f = 2 \times$ puolet laipan paksuudesta)	$h := 46\text{mm}$
Ylälaipan leveys, (puristettu laippa)	$a := 51\text{mm}$
Alalaipan leveys, (vedetty laippa)	$b := 51\text{mm}$
Ylälaipan taitoksen leveys	$a_1 := 32.5\text{mm}$
Alalaipan taitoksen leveys	$b_1 := 32.5\text{mm}$
Taivutussäde	$r := 3\text{mm}$
Reunakäänteen kokonaiskorkeus	$c := 7\text{mm}$
Profiilin bruttopinta-ala	$A_g := 381.3\text{mm}^2$
Profiilin efektiivinen pinta-ala	$A_{\text{eff}} := 352.8\text{mm}^2$
Profiilin metripaino	$m_g := \rho_s \cdot A_g$
Jakoväli	$kk := 600\text{mm}$
Vapaa jänneväli	$L_a := 2700\text{mm}$
Z60t2 Rangan tehollinen jäyhyysmomentti	$I_y := 2.0087 \cdot 10^5 \text{mm}^4$
Z60t2 Rangan tehollinen taivutusvastus	$W_y := 6.7072 \cdot 10^3 \text{mm}^3$
Z60t2 Orren taivutuskestävyyden mitoitusarvo	$M_{y,Rd} := 2.348 \cdot \text{kN} \cdot \text{m}$



## Tuulikuorman laskenta "SFS-EN 1991-1-4"

Ilman tiheys  $\rho := 1.25 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$  (SFS-EN 1991-1-4. 4.5. Suositusarvo)

Maastoluokka 0  $z_0 := 0.003\text{m}$  Maastoparametri  
 $z_{\min} := 1\text{m}$

Maasto on tasainen, jonka seurauksena:

Nopeuspaineen suurennuskerroin toispuoleisille maastonkuormille  $\gamma_D := 1$

Rakennuspaikan sijainnista määräytyvä suurennuskerroin  $c_0 := 1$

Oletetaan rakennuksen olevan matala  $h < b$

### ***Puuskanopeuspaine "RIL 201-1-2017 s. 137 / SFS-EN 1991-1-4. 4.5."***

Puuskanopeuspaineen ominaisarvo saadaan RIL201-1-2017 taulukosta 4.2S. s.137

$q_{p10} := 1.09 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2}$  (RIL 201-1-2017 s.137 taulukko 4.2S)

### ***Kokonaistuulivoiman laskenta voimakertoimen $c_f$ avulla***

$c_{scd} := 1$  (SFS-EN1991-1-4. 6.2.(1))

### **Voimakertoimen määrittäminen**

Voimakerroin saadaan RIL 201-1-2017 kuvasta 5.2S. Sivusuhteen (d/b) oletetaan olevan 2 ja  $h < b$ .

$h_{\text{rakennus}} := 10\text{m}$

$b_{\text{rakennus}} := 20\text{m}$

$\lambda_{\text{tuuli}} := \frac{2h_{\text{rakennus}}}{b_{\text{rakennus}}} = 1$

$c_f := 1.0$

Käytetään  $\lambda$  arvona taulukosta saatavaa arvoa 1 ja oletetaan d/b suhde. RIL 201-1-2017. Taulukko 5.2S.

$A_{\text{ref}} := h_{\text{rakennus}} \cdot b_{\text{rakennus}} = 200\text{m}^2$

$F_w := c_{scd} \cdot c_f \cdot q_{p10} \cdot A_{\text{ref}} = 218 \cdot \text{kN}$  (RIL 201-1-2017 Kuva 5.2S)

Tuulikuormaksi saadaan

$q_{w,k} := \frac{F_w}{A_{\text{ref}}} = 1.09 \cdot \frac{\text{kN}}{\text{m}^2}$

Yhdelle orrelle metrin matkalle vaikuttava tasainen tuulikuorma on suuruudeltaan

$$A_{\text{seinä}} := k_k \cdot L_a = 1.62 \text{ m}^2$$

$$Q_k := \frac{(q_{w,k} \cdot A_{\text{seinä}})}{L_a} = 0.654 \cdot \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

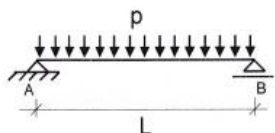
## Murtorajatilan kuormayhdistelmät

MRT kuormien osavarmuuskertoimet

$$\gamma_{Q1} := 1.5 \quad \text{Ainoana muuttuvana kuormana on koko jännevälillä vaikuttava tuulikuorma, joka on tasainen kuorma}$$

$$Q_d := \gamma_{Q1} \cdot Q_k \cdot K_{FI} = 0.981 \cdot \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

## Voimasuureet



$$M_{\max} = \frac{1}{8} \cdot p \cdot L^2 \quad v_{\max} = \frac{5}{384} \cdot \frac{p \cdot L^4}{E \cdot I}$$

$$V_{\max} = \frac{p \cdot L}{2}$$

Taivutusmomentti

$$M_{Ed} := \frac{1}{8} \cdot Q_d \cdot L_a^2 = 0.894 \cdot \text{kN} \cdot \text{m}$$

Leikkausvoima

$$V_{Ed} := \frac{Q_d \cdot L_a}{2} = 1.324 \cdot \text{kN}$$

Taivutusmomentti  
jännevälin eri pisteissä

$$M(x) := \frac{Q_d \cdot x}{2} \cdot (L_a - x)$$

Leikkausvoima  
jännevälin eri pisteissä

$$V(x) := \left| Q_d \cdot \left( \frac{L_a}{2} - x \right) \right|$$

## Mitoitus

### Taivutuskestävyys. "SFS-EN 1993-1-3, 6.1.4.1"

$$\gamma_{M1} := 1.0$$

$$\gamma_{M0} := 1.0 \quad (\text{SFS-EN 1993-1-3, 6.1(1)})$$

$$\gamma_{M2} := 1.25$$

Orren taivutuskestävyyden mitoitusarvo

$$M_{y,Rd} = 2.348 \cdot \text{kN} \cdot \text{m}$$

Momenttikestävyyden käyttöaste

$$\frac{M_{Ed}}{M_{y,Rd}} = 0.381$$

### Leikkauslommahduskestävyys. "SFS-EN 1993-1-3, 6.1.5"

$$V_{b,Rd} = \frac{\frac{h_w}{\sin \phi} \cdot t \cdot f_{bv}}{\gamma_{M0}}$$

Laippojen välinen etäisyys

$$h_w := h + t = 48 \cdot \text{mm}$$

Uuman muunnetun hoikkuuden  $\lambda_w$  laskeminen:

Uuman nurkan keskipisteen välinen korkeus

$$s_w := h - t - r = 41 \cdot \text{mm}$$

Uuman muunnettu hoikkuus uumalle,  
jolla ei ole pituussuuntaisia jäykisteitä

$$\lambda_w := 0.346 \cdot \frac{s_w}{t_{eff}} \cdot \sqrt{\frac{f_{yb}}{E_s}} = 0.479$$

Leikkauslommahduslujuus "SFS-EN 1993-1-3, taulukko 6.1"

Uumalle, jossa tuen kohdalla ei ole jäykistettä:  
(Antaa varmalla puolella oleva tulos)

$$f_{bv} := 0.58 \cdot f_{yb} = 0.203 \cdot \frac{\text{kN}}{\text{mm}^2}$$

Uuman kaltevuus suhteessa laippoihin

$$\phi := \frac{\pi}{2} \quad (\text{Kuva 6.5})$$

Leikkauskestävyyden mitoitusarvo

$$V_{b,Rd} := \frac{\frac{h_w}{\sin(\phi)} \cdot t_{eff} \cdot f_{bv}}{\gamma_{M0}} = 11.79 \cdot \text{kN}$$

Leikkauskestävyyden käyttöaste

$$\frac{V_{Ed}}{V_{b.Rd}} = 0.112$$

## Taipuma

Luokka E: Varastotilat SFS-EN 1990, Taulukko A1.1

$$\psi_{1.1} := 1$$

(Normaali yhistelmä)

Osavarmuuskertoimet käyttörajatilassa

$$\gamma_{Q.sls} := 1.0$$

Käyttörajatilan kuormitus

$$Q_{sls} := \gamma_{Q.sls} \cdot Q_K \cdot \psi_{1.1} = 0.654 \cdot \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

Taipuman suuruus

$$w_{\max} := \frac{5}{384} \cdot \frac{Q_{sls} \cdot L_a^4}{E_s \cdot I_y} = 10.728 \cdot \text{mm}$$

Taipuman raja-arvo

$$w_{\text{sall}} := \frac{L_a}{150} = 18 \cdot \text{mm}$$

(NA SFS-EN 1993-1-1, Taulukko 7.1 (FI))

## Tulokset

Momenttikestävyys	$n_{M.sall} \leq 1$		
$n_{M.sall} := \frac{M_{Ed}}{M_{y.Rd}} = 0.381$			OK
Lommahdusleikkauskestävyys	$n_{V1.sall} \leq 1$		OK
$n_{V1} := \frac{V_{Ed}}{V_{b.Rd}} = 0.112$			
Kestävyys taivutusta vastaan			
Taipuman suuruus	$w_{max} = 10.728 \cdot \text{mm}$		
Taipuman raja-arvo	$w_{sall} = 18 \cdot \text{mm}$	$w_{max} < w_{sall}$	OK
Taipuman käyttöaste			
$\frac{w_{max}}{w_{sall}} = 0.596$			